

Het effect van ontwerpmaatregelen bij trein-geïnduceerde trillingen in woongebouwen

D. Westerink

28 juni 2023



Het effect van ontwerpmaatregelen bij trein-geïnduceerde trillingen in woongebouwen

door

D. Westerink

studentnummer: 5180325
ter verkrijging van de graad van Master of Science
aan de Technische Universiteit Delft,

Afstudeercomité:

Ass. Prof. dr. ir. M.J.M.M. Steenbergen (voorzitter)	TU Delft, Mechanics and Physics of Structures
Prof. dr. ir. J.G. Rots (begeleider)	TU Delft, Applied Mechanics
ir. A.C.B. Schuurman (begeleider)	TU Delft, Applied Mechanics
ir. P.A. Korswagen Eguren (begeleider)	TU Delft, Applied Mechanics
ir. A.J. Robbemont (externe begeleider)	Zonneveld Ingenieurs

Samenvatting

Vanwege het woningtekort in Nederland gecombineerd met de schaarse stedelijke ruimte is het uitwijken naar bouwen naast het spoor een alternatief. Als gevolg worden de gebouwen blootgesteld aan trein-geïnduceerde trillingen die kunnen leiden tot trillingshinder.

Een trilling die trillingshinder kan veroorzaken kan op verschillende manieren worden gereduceerd. De maatregelen kunnen bij de bron of gedurende de transmissie van de trilling uitgevoerd worden. Ook kunnen maatregelen bij de ontvanger van de trilling worden uitgevoerd. Deze thesis richt zich op deze laatste groep. Hiervoor is gebruik gemaakt van het woord: ontwerpmaatregelen.

De ontwerpmaatregelen zijn toegepast op een vierlaags woongebouw. Hierbij is onderscheid gemaakt in verschillende materialen. Het conventionele bouw materiaal beton is als referentie gebruikt voor het onderzoeken van kruislings gelaagd hout, ook bekend als CLT.

Dit onderzoek heeft als doel ontwerpmaatregelen voor CLT- en betongebouwen aan te reiken, zodat de trillingshinder wordt verminderd en het aan de gestelde richtlijnen voldoet. Hierdoor kan men meer naast het spoor bouwen. De centrale onderzoeksvraag richt zich op het bepalen van de specifieke ontwerpmaatregelen waarmee een reductie van trillingshinder wordt behaald, zodanig dat het in overeenstemming is met de gestelde richtlijnen.

Om deze vraag te beantwoorden is een methode ontwikkeld om trillingshinder te voorspellen op basis van trein-geïnduceerde trillingen. Vanuit de methode worden voorwaarden gesteld aan de trein-geïnduceerde trilling en het bijbehorende frequentiespectrum.

Ook zijn in de methode de effectiefste ontwerpmaatregelen voor CLT bepaald aan de hand van eigenfrequentie analyses. Hiervoor zijn analytische balkmodellen en numerieke raamwerkmodellen opgesteld. De onderzochte ontwerpmaatregelen voor het analytische balkmodel zijn: variatie van de dikte van de buitenste CLT-lagen, variatie van de totale vloerdikte, variatie van de overspanning en variatie van de additionele permanente belasting. De onderzochte ontwerpmaatregelen voor de numerieke raamwerkmodellen zijn: variatie van vloerdikte, variatie van wanddikte, variatie van vloer- en wanddikte gecombineerd, variatie van overspanning, het toepassen van één of twee stramien naast elkaar en het toepassen van starre vloerverbindingen. Uit de analyse blijkt dat de ontwerpmaatregelen gerelateerd aan de vloerdikte, wanddikte en overspanning het meeste effect op de eigenfrequentie van de vloer hebben. Deze ontwerpmaatregelen zijn toegepast in het vervolg van het onderzoek.

De methode beschrijft ook de toepassing van een eindig elementen model. Dit model wordt gebruikt voor het uitvoeren van een tweetal dynamische analyses. Ten eerste, een frequentierespons analyse waarmee een trilling met constante amplitude is vertaald naar resonantiegevoelige frequenties van het gebouw. Door de omhullende frequentierespons van verschillende vloerlocaties toe te passen is een bovengrensbepaling gevonden. Ten tweede is een lineaire tijdsafhankelijke analyse uitgevoerd welke een trein-geïnduceerde trilling vertaalt naar een vloertrilling. Deze vloertrilling wordt met de Stichting Bouwresearch (SBR) richtlijn-B vertaald naar een waarde voor het aangeven van het risico op trillingshinder.

Om het voorspellend vermogen van de methode te valideren is deze toegepast op een casus in Arnhem. Hierbij zijn de resultaten getoetst met de SBR richtlijn-B. Met behulp van deze richtlijn is hinder voor personen in gebouwen gedurende de nachtperiode bepaald. Nieuwe en bestaande situaties zijn in beschouwing genomen.

De prognose is gekwantificeerd door de amplitude van de resonantiepiek te vermenig-

vuldigen met de trillingsterkte van het spectrum. De kwantitatieve prognose toont een gelijkwaardige trend met de toe- en afname van de toetsing van het risico van trillingshinder. Maar deze voorspelling onderschat de toename van het risico op trillingshinder bij ontwerpmaatregelen met een resonantiepiek rond de 10 Hz en de 12 Hz. Bij het merendeel van de overige maatregelen is het verschil maximaal 25%. Hiermee heeft de methode haar doeltreffendheid bewezen in het voorspellen van trillingshinder bij de toepassing van verschillende ontwerpmaatregelen.

Bij het CLT-model blijken een tweetal ontwerpmaatregelen effectief voor het reduceren van de trillingshinder die voldoen aan de streefwaarden uit de SBR-richtlijn: het vergroten van de overspanning en het toepassen van doorlopende tussenwanden over de gehele hoogte van het gebouw. Ook voor beide betonmodellen blijkt het vergroten van de overspanning te zorgen voor een reductie dat het voldoet aan de streefwaarden. Specifiek voor het betonmodel met ingeklemde vloeren blijkt ook het verkleinen van de overspanning te resulteren in een reductie van de trillingshinder die voldoet aan de streefwaarden van de SBR.

Om de toepasbaarheid van de methode verder vast te stellen, is het noodzakelijk om deze op meerdere locaties toe te passen. Daarbij wordt aangeraden om een spectrum van de trein-geïnduceerde trillingen te gebruiken dat de volledige frequentie-inhoud bevat. Middeling van de frequentie-inhoud wordt afgeraden.

Door de bewezen effectiviteit van de methode middels de casus in Arnhem, is de methode toepasbaar op nieuwbouwprojecten naast het spoor voor heel Nederland. Hierdoor draagt dit onderzoek bij aan het oplossen van de woningnood. Door de positieve resultaten uit het onderzoek voor het toepassen van het materiaal CLT bij nieuwbouwprojecten naast het spoor, kan dit onderzoek ook bijdragen aan het verduurzamen van de bouwsector.

Abstract

Because of the housing shortage in the Netherlands combined with scarce urban space, diverting to building next to the railway is an alternative. As a result, buildings are exposed to train-induced vibrations that can lead to vibration nuisance.

A vibration that can cause vibration nuisance can be reduced in several ways. Measures can be implemented at the source or during the transmission of the vibration. Measures can also be carried out at the receiver of the vibration. This thesis focuses on the latter group. For this purpose, the word: design measures has been used.

The design measures are applied to a four-storey residential building. A distinction has been made between different materials. The conventional building material concrete has been used as a reference to investigate cross-layered timber.

This study aims to provide design measures for CLT and concrete buildings to reduce vibration nuisance and meet the set guidelines. This will allow more buildings to be built next to the track. The central research question focuses on determining the specific design measures by which a reduction in vibration nuisance is achieved, such that it complies with the set guidelines.

To answer this question, a method has been developed to predict vibration nuisance based on train-induced vibrations. From the method, conditions are set for the train-induced vibration and the corresponding frequency spectrum.

The method also determined the most effective design measures for CLT using eigenfrequency analyses. Analytical beam models and numerical frame models were prepared for this purpose. The design measures investigated for the analytical beam model are: variation of the thickness of the outer CLT layers, variation of the total floor thickness, variation of the span and variation of the additional permanent load. The design measures investigated for the numerical framework models are: variation of floor thickness, variation of wall thickness, variation of floor and wall thickness combined, variation of span, applying one or two grids side by side and applying rigid floor connections. The analysis indicates that the design measures related to floor thickness, wall thickness and span have the most effect on the eigenfrequency of the floor. These design measures were applied in the remainder of the study.

The method also describes the application of a finite element model. This model is used to perform two dynamic analyses. First, a frequency response analysis by which a vibration with constant amplitude is translated into resonance-sensitive frequencies of the building. By applying the envelope frequency response of different floor locations, an upper boundary approximation is found. Second, a linear time-dependent analysis has been performed which translates a train-induced vibration into a floor vibration. This floor vibration is translated using the Construction Research Foundation (SBR) guideline-B into a value for indicating the risk of vibration nuisance. To validate the predictive ability of the method, it has been applied to a case study in Arnhem. Here, the results have been tested with the SBR guideline-B. This guideline is used to determine annoyance for people in buildings during the night period. New and existing situations have been considered.

The prognosis has been quantified by multiplying the amplitude of the resonance peak by the vibration strength of the spectrum. The quantitative forecast shows an equivalent trend with the increase and decrease in the test of vibration nuisance risk. But this prediction underestimates the increase in vibration nuisance risk for design measures with a resonance

peak around 10 Hz and 12 Hz. For most of the remaining measures, the difference is at most 25%. With this, the method has proven its effectiveness in predicting vibration nuisance when applying different design measures.

For the CLT model, two design measures are found to be effective in reducing vibration nuisance that meet the target values from the SBR guideline: increasing the span and applying continuous partitions over the entire height of the building. Also for both concrete models, increasing the span appears to provide a reduction that meets the target values. Specifically for the concrete model with sandwiched floors, reducing the span also appears to result in a vibration nuisance reduction that meets the SBR target values.

To further establish the applicability of the method, it is necessary to apply it at several locations. In doing so, it is recommended to use a spectrum of train-induced vibrations that contains the full frequency content. Averaging of the frequency content is not recommended.

Due to the proven effectiveness of the method through the case study in Arnhem, the method can be applied to new construction projects next to the railway for the whole of the Netherlands. As a result, this research contributes to solving the housing shortage. Due to the positive results of the research for applying the material CLT in new construction projects next to the railway, this research can also contribute to making the construction sector more sustainable.

Inhoudsopgave

1	Introductie, onderzoeksdoelstelling, en -vraag	1
2	Overzicht literatuur	5
2.1	Eigenschappen CLT	5
2.2	Trein-geïnduceerde trillingen	7
2.2.1	Type contributie trein-geïnduceerde trillingen	8
2.2.2	Trillingen van goederentreinen	8
2.3	Toetsingskader	8
2.4	Ontwerpmaatregelen	10
3	Methodiek	13
3.1	Uitgangspunten	13
3.1.1	Algemene ontwerp uitgangspunten	13
3.1.2	Uitgangspunten referentiemodel CLT	14
3.1.3	Uitgangspunten referentiemodel beton	17
3.2	Effect van trillingshinder bij trein-geïnduceerde trillingen	18
3.3	Trein-geïnduceerde trilling	18
3.4	Toetsingskader	18
3.5	Ontwerpmaatregelen	19
3.5.1	Ontwerpmaatregelen – balkmodel	19
3.5.2	Ontwerpmaatregelen – raamwerkmodel	21
3.6	Eindig elementen model	23
3.6.1	Geometrie	23
3.6.2	Materiaal	24
3.6.3	Demping	24
3.6.4	Belastingen	26
3.6.5	Ontwerpmaatregelen	26
3.6.6	Dynamische analyses	27
4	Methode – Omhullende frequentierespons	29
4.1	Referentiemodellen CLT en beton	29
4.2	Ontwerpmaatregel: Vloerdikte	30
4.2.1	Vergelijken CLT en betonnen modellen	32
4.3	Ontwerpmaatregel: Wanddikte	32
4.3.1	Vergelijken CLT en betonnen modellen	34
4.4	Ontwerpmaatregel: Overspanning	35
4.4.1	Vergelijken CLT en betonnen modellen	36
4.5	Ontwerpmaatregel: tussenwanden	37
4.6	Conclusie	38
5	Casus - Beschrijving en prognose van trillingshinder	39
5.1	Casus selectie	39
5.2	Analyseren datacollectie	40
5.3	Keuze voor maatgevende excitatie	42
5.3.1	Numerieke vertaling trein-geïnduceerde trilling	43

5.4	Kwalitatieve prognose trillinshinder	43
5.4.1	Prognose trillingshinder van referentiemodellen	43
5.4.2	Prognose trillingshinder van modellen met ontwerpmaatregelen	43
5.5	Kwantitatieve prognose trillinshinder	45
5.6	Conclusie	46
6	Casus – toetsing van trillingshinder	47
6.1	Trillingshinder referentiemodellen	47
6.2	Trillingshinder bij toepassing ontwerpmaatregelen	50
6.2.1	Vloerdikte	50
6.2.2	Wanddikte	50
6.2.3	Overspanning	51
6.2.4	Tussenwanden	51
6.3	Relatie tussen toetsing en kwantitatieve prognose	52
6.4	Conclusie	52
7	Discussie, conclusie en aanbevelingen	53
7.1	Discussie	53
7.2	Conclusie	55
7.3	Aanbevelingen	56
	Literatuurlijst	57
A	Berekening CLT en beton elementen	61
A.1	Uitgangspunten	61
A.2	Berekening CLT elementen	62
A.2.1	Dimensie CLT vloer 160 mm	64
A.2.2	Dimensie CLT wand 60 mm	66
A.2.3	Dimensie CLT wand 80 mm	68
A.3	Berekening betonnen elementen	69
A.3.1	Controle betonvloer dikte 210 mm	69
A.3.2	Controle betonnen tussenwand dikte 100 mm	82
A.3.3	Controle betonnen buitenwand dikte 100 mm	86
A.4	Controle scheuren van beton	88
B	Bepalen effectiefste ontwerpmaatregelen	91
B.1	Eigenfrequentie referentie modellen	91
B.2	Gevoeligheidsanalyse	91
B.2.1	Gevoeligheidsanalyse - balkmodel	92
B.2.2	Gevoeligheidsanalyse - raamwerkmodel	93
B.3	Conclusie	97
C	Gevoeligheid van demping op CLT-model	99
C.1	Frequentierespons analyse	99
C.1.1	Conclusie	99
C.2	Tijdsafhankelijke lineaire analyse	100
C.2.1	Conclusie	102
D	Numerieke eigenschappen CLT	103
E	Bewijs lineair verband tijdsignaal frequentie spectrum	107
F	Figuren voorspellen trillingshinder	109

G Resultaten LTHA	115
G.1 Referentie modellen	115
G.2 Ontwerpmaatregelen	117
G.2.1 Vloerdikte	118
G.2.2 Wanddikte	122
G.2.3 Overspanning	126
G.2.4 Tussenwanden	130
H Effect van aanpassing op spectrum	153
I Tabellen kwantitatieve prognose	157

1

Introductie, onderzoeksdoelstelling, en -vraag

De Nederlandse bevolking kampt momenteel met een van de grootste woningtekorten van de laatste vijftig jaar. Het tekort bedraagt meer dan 390.000 huizen [1]. Om dit probleem op te lossen, presenteerde een bouwcoalitie bestaande uit 34 organisaties een plan om de komende tien jaar een miljoen huizen te bouwen [2]. Dit plan klinkt als een adequate oplossing, maar door de schaarste in de steeds groeiende stedelijke gebieden is het lastig om beschikbare bouwgrond te vinden [3].

Naast veel spoorwegen is vaak ruimte beschikbaar dat gebruikt kan worden voor woningbouw. Utrecht [4], Amersfoort [5] en Gouda [6] zijn voorbeelden waar het woningtekort tegengegaan wordt door wijken naast het spoor aan te leggen. Tegelijkertijd vergt bouwen naast het spoor meer aandacht in verband met trillingen die veroorzaakt worden door treinen.

Samen met het woningtekort speelt een ander, belangrijk, aspect in de bouw een rol: de verduurzamingsopgave. De bouw is verantwoordelijk voor ongeveer 38% van de totale wereldwijde CO₂-uitstoot, aldus Durmisevic et al. [7]. De conventionele bouwstijl, bijvoorbeeld met beton of staal, is milieubelastend door de hoge concentratie CO₂ die vrijkomt tijdens het productieproces. Daarom is gezocht naar alternatieve bouwmethodes. Eén van die bouwmethodes is houtbouw en dan in het bijzonder kruislings verlijmd hout – in het Engels cross laminated timber (CLT) genoemd. Deze lichtgewicht bouwmethode is bijzonder sterk door de lage dichtheid en hoge stijfheid van het materiaal. Daarbij blijkt uit een rapport van TNO dat een CLT-appartement een lagere CO₂-voetprint heeft vergeleken met de betonnen variant [8]. Hierbij is uitgegaan van een rekenmethode met tijdelijke CO₂-vastlegging.

Door CLT-woningen naast het spoor te bouwen, lijken bovenstaande twee problemen opgelost te worden. Maar CLT kan vatbaar zijn voor trillingen. Meestal leiden trillingen alleen tot irritatie, maar blootstelling aan trillingen kan ook leiden tot ernstige slaapverstoring met mogelijke lange termijn gezondheidseffecten zoals hart- en vaatziekten [9]. Door het bouwen langs het spoor met CLT is de kans groter dat trillingshinder ontstaat door trein-geïnduceerde trillingen. Mede daarom raadt het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat af om met lichtgewicht constructies, zoals CLT, te bouwen naast het spoor [10].

Om de hinder van trein-geïnduceerde trillingen te reduceren zijn diverse maatregelen beschikbaar. Zo zijn maatregelen beschikbaar die de trilling reduceren bij de bron. Dit komt neer op het dempen van het spoortracé of het onderstel van de trein. Omdat het spoor in de meeste gevallen ter plaatse aanwezig is en het tijdelijke afsluiten van het spoor grote economische gevolgen kan hebben, worden bronmaatregelen meestal niet toegepast.

Als alternatief kunnen transmissie-maatregelen worden genomen die de trein-geïnduceerde trilling onderweg van de bron naar de ontvanger reduceren. Bijvoorbeeld door de toepassing van diepwanden langs het spoortracé. Deze maatregelen kunnen economisch nadelig zijn doordat de maatregelen naast de gehele bouwlocatie uitgevoerd moeten worden. Daarbij is voor de uitvoering van het toepassen van diepwanden relatief veel ruimte nodig, dat vaak niet aanwezig is. Ook dient – voor een groter effect – de maatregel dicht bij het bestaande spoortracé uitgevoerd te worden, dat ook gevolgen kan hebben voor de beschikbaarheid van het spoortracé.

Als laatste kan een maatregel worden getroffen bij de ontvanger. Hierbij wordt de ontvanger, in dit geval een woongebouw, zodanig ontworpen dat deze minder kwetsbaar is voor de trein-geïnduceerde trilling. Maatregelen bij de ontvanger hebben in deze thesis de benaming ontwerpmaatregelen gekregen. Het voordeel van ontwerpmaatregelen is dat het spoor niet tijdelijk afgesloten hoeft te worden. Voorbeelden hiervan zijn het modificeren van wanden of vloeren.

Met de toepassing van ontwerpmaatregelen kan de trein-geïnduceerde trilling dusdanig gereduceerd worden dat geen trillingshinder meer aanwezig is. Echter, de vraag is hoe de trillingshinder bepaald wordt. Omdat de trein-geïnduceerde trillingen doorgaans lichter zijn dan aardbevingen, heeft een trein-geïnduceerde trilling voornamelijk betrekking tot het gebruikscomfort van de bewoner. Daarom worden vanuit de gehanteerde bouwnormen geen eisen gesteld aan trillingen. Desalniettemin moet een manier gevonden worden om trillingen te linken aan trillingshinder. Verschillende nationale en internationale richtlijnen bieden hiervoor de oplossing. Hiervan dient de geschiktste richtlijn gekozen te worden die hinder afkomstig van trein-geïnduceerde trillingen beoordeeld.

De huidige onderzoeken die gerelateerd zijn aan trillingen en CLT gaan voornamelijk over seismische trillingen [11–13]. Bij deze onderzoeken is de bezwijkcapaciteit van de CLT-platen en de verbindingen bepaald. Terwijl bij een trein-geïnduceerde trilling de bezwijkcapaciteit niet wordt bereikt wegens een lagere trillingssterkte.

Ook zijn onderzoeken uitgevoerd waarbij de trillingshinder van looptrillingen op CLT-vloeren is onderzocht [14–16]. Looptrillingen worden – net als trein-geïnduceerde trillingen – geassocieerd met het gebruikerscomfort. Toch is het karakter van looptrillingen dusdanig verschillend, dat ontwerpmaatregelen voor trillingshinder van beide typen trillingen afzonderlijk beschouwd moeten worden.

Wat betreft trein-geïnduceerde trillingen is met name onderzoek gedaan naar de respons van betonconstructies, waarbij transmissie-reducerende maatregelen zijn toegepast [17, 18].

Verschillende onderzoeken zijn uitgevoerd in relatie tot de reductie van trein-geïnduceerde trillingen in CLT- en betonnen gebouwen. Bij ieder onderzoek ontbreekt een essentieel onderdeel, waardoor het onderzoek niet toepasbaar is voor wonen met CLT naast het spoor. Daarom is een onderzoeksvraag opgesteld die van toepassing is voor wonen naast het spoor. *Welke ontwerpmaatregelen zorgen voor een zodanige reductie van trein-geïnduceerde trillingen in CLT en betonnen woongebouwen, dat deze voldoen aan de toepasbare richtlijnen?*

De volgende subvragen zijn opgesteld voor het beantwoorden van de hoofdvraag:

1. Hoe wordt een numeriek model van een CLT en betonnen constructie opgebouwd?
2. Wat zijn mogelijke ontwerpmaatregelen om een trein-geïnduceerde trilling in een gebouw te reduceren?
3. Welke frequenties zijn bijzonder relevant bij het ontwerpen van een CLT en betonnen

woongebouw?

4. Wat is een effectieve methode voor het beoordelen van trillingshinder?
5. Wat is de relatie tussen de relevante frequenties van het woongebouw en de respons van een trein-geïnduceerde trilling?

Dit is het eerste onderzoek dat een methode opstelt waarmee trein-geïnduceerde trillingen worden gereduceerd door de toepassing van ontwerpmaatregelen in CLT-woongebouwen, zodanig dat deze binnen het toepasbare toetsingskader valt.

De maatschappij heeft een zeker belang bij dit onderzoek, omdat het bijdraagt aan een oplossing voor de woningnood en tegelijkertijd duurzaamheid nastreeft.

Het onderzoek richt zich specifiek op vierlaagse woongebouwen. Door meer woonlagen toe te voegen, kan het effect van een trilling per woonlaag verschillen. Gekozen is voor woongebouwen tegenover kantoorgebouwen, enerzijds vanwege de impact op de woningnood, anderzijds gelden voor woningen strengere richtlijnen vergeleken met kantoorgebouwen.

De thesis is opgebouwd uit zeven hoofdstukken. Na de introductie (Hoofdstuk 1) is de relevante informatie uit het literatuuronderzoek toegelicht (Hoofdstuk 2). Hiermee krijgt de lezer de benodigde theoretische basis mee voor de rest van het onderzoek. Vervolgens is in Hoofdstuk 3 de methodiek beschreven waarmee voorspeld kan worden welke ontwerpmaatregelen zorgen voor een reductie van trillingshinder bij een CLT en betonnen woongebouw. Deze methode is getoets aan de hand van een casus. In Hoofdstuk 5 is het gemeten trillingsspectrum van de casus en de toegepaste excitatie toegelicht. In ditzelfde hoofdstuk is ook de prognose van trillingshinder weergegeven. Het opvolgende Hoofdstuk 6 toont de toetsing van het effect van de ontwerpmaatregelen op de trillingshinder en de relatie van de toetsing tot de prognose van trillingshinder. Hoofdstuk 7 beschrijft de discussie, de conclusie en de aanbevelingen.

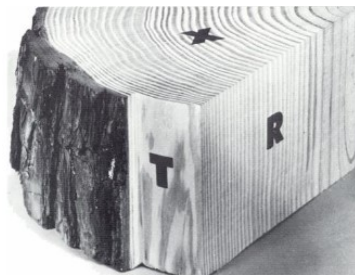
2

Overzicht literatuur

Hoofdstuk 2 toont belangrijke informatie uit de literatuurstudie die benodigd is voor het begrijpen van het onderzoek. De relevante literatuur wordt beschreven aan de hand van enkele onderwerpen. Eerst worden de relevante eigenschappen en rekenmethode van CLT benoemd. Daarna wordt de relevante literatuur over trein-geïnduceerde trillingen uitgelegd en wordt toegelicht welke toetsingskader voor trillingshinder wordt gebruikt. Tot slot worden de gekozen ontwerpmaatregelen uit de literatuur gemotiveerd.

2.1. Eigenschappen CLT

De eigenschappen en rekenmethode van CLT verschillen zodanig met materialen zoals beton of staal dat literatuur over de eigenschappen en rekenwijze van CLT gewenst is. CLT is een houtproduct bestaande uit kruislings gelijmde houten planken. Deze planken bestaan uit langgerekte houtvezels. Als gevolg van de langgerekte cel-structuur verschillen de mechanische eigenschappen in longitudinale, transversale en radiale richting (zie Figuur 2.1) [19]. Hiervan is de longitudinale richting het sterkst in vergelijking met de transversale en radiale richting. Door

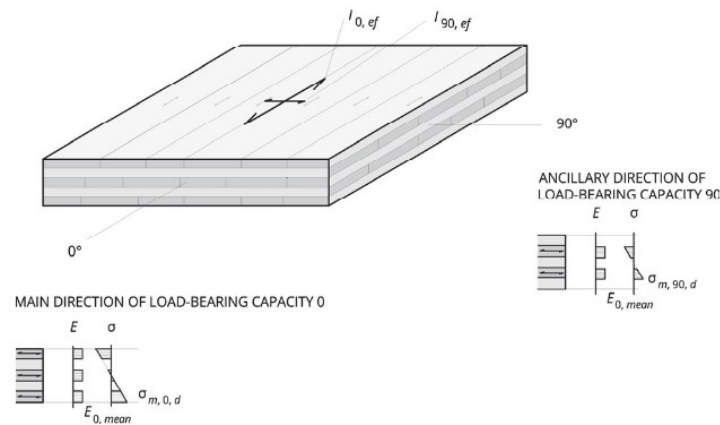


Figuur 2.1: Vezelrichtingen in hout, met T - de transversale, R - de radiale en X - de longitudinale richting [20]

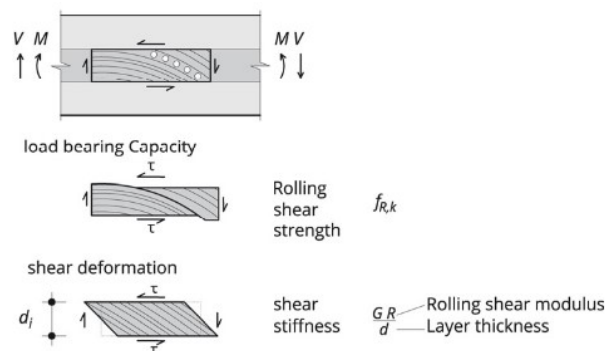
het productieproces, waarbij planken loodrecht op elkaar worden gelijmd, ontstaat zowel in de longitudinale als in de transversale richting draagvermogen. Doordat de longitudinale richting uit meer houtlagen bestaat dan de transversale richting, is het longitudinale draagvermogen groter dan in transversale richting en wordt CLT als een orthotroop materiaal beschouwd [19]. Dit resulteert in een afwijkende berekenwijze vergeleken een isotroop materiaal dat zowel in longitudinale als transversale richting hetzelfde draagvermogen heeft.

Voor het berekenen van buigspanningen in de CLT-doorsnede worden enkel houtlagen in rekening gebracht met een vezelrichting evenwijdig aan de draagricting [21]. Dit houdt in dat spanning in de transversale houtlagen niet wordt beschouwd. Figuur 2.2 toont een CLT-plaat waarbij het spanningsverloop aan twee zijden is weergegeven.

Vanwege de transversale tussenlagen kan het hout scheuren over de jaarringen zoals weergegeven in Figuur 2.3. Het is daarom van belang om voor CLT bij de rekenmethode rekening te houden met rol-afschuifstijfheid [19, 21, 22].



Figuur 2.2: Draagvermogen CLT-element [21]



Figuur 2.3: Afschuif- en rolafschuifspanning proHolz

Rekening houdend met rol-afschuifstijfheid, is gekozen om liggerberekeningen met de Gamma-methode uit te voeren. Deze methode rekent γ -factoren uit die de rol-afschuifstijfheid in rekening brengen door het "Steiner" gedeelte van het oppervlaktetraagheidsmoment te reduceren. Ook heeft de γ -factor invloed op het zwaartepunt van de doorsnede ten opzichte van het totale zwaartepunt. Alhoewel voor een symmetrische CLT-plaat geldt dat het zwaartepunt altijd gelijk is aan het geometrische zwaartepunt. Met de Gamma-methode wordt het effectieve oppervlaktetraagheidsmoment en de effectieve buigstijfheid berekend, deze zijn weergegeven in Vergelijking (2.1) en Vergelijking (2.2) in de longitudinale richting. Het voordeel van rol-afschuifstijfheid in rekening brengen middels de γ -factoren is dat de Euler-Bernoulli theorie toegepast kan worden. Deze theorie gaat alleen uit van vervorming als gevolg van buiging en houdt per definitie geen rekening met afschuifvervorming. Het voordeel van deze theorie is dat het in veel rekenprogramma's toepasbaar is, omdat het wordt gezien als de standaard rekenmethode.

$$I_{0,ef} = \sum_{i=1}^N \frac{E_i}{E_{ref}} \cdot \frac{b \cdot d_i^3}{12} + \sum_{i=1}^N \gamma_i \cdot \frac{E_i}{E_{ref}} \cdot b \cdot d_i \cdot a_i^2 \quad (2.1)$$

$$EI_{0,ef} = \sum_{i=1}^N E_i \cdot \frac{b \cdot d_i^3}{12} + \sum_{i=1}^N \gamma_i \cdot E_i \cdot b \cdot d_i \cdot a_i^2 \quad (2.2)$$

Met:

$I_{0,ef}$ – effectieve oppervlaktetraagheidsmoment in $[\text{mm}^4]$;

E_i – elasticiteitsmodulus van de longitudinale laag i $[\text{N}/\text{mm}^2]$;

E_{ref} – referentie elasticiteitsmodulus $[\text{N}/\text{mm}^2]$;

b – plaatbreedte $[\text{mm}]$;

d_i – dikte van de longitudinale laag i $[\text{mm}]$;

a_i – afstand van het zwaartepunt tot het totale zwaartepunt per longitudinale laag i $[\text{mm}]$;

γ_i – factor voor het in rekening brengen van rol-afschuifstijfheid per longitudinale laag i [-].

Voor de numerieke invoer van CLT-platen wordt onderscheid gemaakt tussen topologische 1-dimensionale liggermodellen en topologische 2-dimensionale plaatmodellen. Liggermodellen zijn minder complex dan plaatmodellen, waardoor de numerieke rekentijd van deze modellen korter is en minder invoerparameters nodig zijn. Het nadeel van liggermodellen is dat diepte van de CLT-plaat niet kan worden beschouwd. Hierdoor is het moeilijker de respons van woongebouwen in de 3-dimensionale ruimte te beschouwen. Dit gaat makkelijker met plaatmodellen.

Bij de liggermodellen wordt orthotropie in het model toegevoegd door het toepassen van de effectieve hoogte. Deze hoogte is bepaald met behulp van het effectieve oppervlaktetraagheidsmoment, waarin de Gamma-methode is verwerkt. De definitie van de effectieve hoogte $d_{0,ef}$ is weergegeven in Vergelijking (2.3).

$$d_{0,ef} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot I_{0,ef}}{b}} \quad (2.3)$$

Voor de numerieke invoer van CLT als plaatmodel wordt de matrix met de constitutieve relaties aangepast [22, 23]. Hierbij zijn orthotrope parameters toegepast op de matrix. In deze parameters is afschuifstijfheid meegenomen, waardoor de plaatmodellen kunnen worden berekend met de Mindlin-Reissner theorie. Deze theorie is geschikt voor plaatmodellen en bevat constitutieve relaties voor zowel buigrek als afschuifrek.

2.2. Trein-geïnduceerde trillingen

Deze paragraaf gaat in op de relevante informatie over een trein-geïnduceerde trilling. Tussen de bron en de ontvanger zijn verschillende componenten die een trein-geïnduceerde trilling kunnen beïnvloeden, zoals de grondopbouw en de afstand. Het type trein is ook van invloed. Relevante factoren zijn: rijnsnelheid, wielconfiguratie, lengte en zwaarte van de verschillende wagons en type locomotief [24]. Een trein-geïnduceerde trilling is onder te verdelen in een quasi-statische contributie en een dynamische distributie. Tot slot wordt specifiek ingegaan op de respons van goederentreinen, vanwege de maatgevende situatie bij de casus.

2.2.1. Type contributie trein-geïnduceerde trillingen

Quasi-statische contributie

De verplaatsing van het quasi-statische deel kan gezien worden als een komvormige zakking op basis van de aslast van de trein. Connolly e.a. concluderen dat deze quasi-statische zakking onafhankelijk is van rijnsnelheid [25]. De respons is dominant naast het spoor tot een afstand van een kwart van de golflengte, aldus Connolly e.a. [25]. De respons op een vast punt in het vrije veld is het gevolg van de opeenvolgende stijgingen en dalingen bij het passeren van elke as. Het herhaaldelijk passeren van assen leidt tot de karakteristieke pieken en dalen in het smalle band-spectrum van de respons [24].

Het spectrum van de quasi-statische bijdrage aan de response van het vrije veld wordt steeds meer geconcentreerd bij lage frequenties naarmate de afstand tot de baan toeneemt. Op grotere afstand van het spoor wordt de aankomst van een enkele as eerder gedetecteerd en duurt de passage ervan langer. De tijdschaal waarop de respons stijgt en daalt, neemt toe met de afstand tot het spoor, wat betekent dat de weergave in het frequentiedomein meer geconcentreerd is bij de lagere frequenties. Daarnaast, wanneer de afstand tot het spoor groter wordt, vallen de bijdrage van verschillende assen en draaistellen samen, waardoor deze niet langer kunnen worden geïdentificeerd in het tijdsignaal en de trillingsrespons.

Dynamische contributie

De dynamische belasting component is bepaald door de trein-spoorinteractie op basis van verschillende excitatie mechanismen: wiel en spoor oneffenheid, impact van platte wielen, impact van spoorverbindingen en parametrische excitatie door de ruimtelijke variatie tussen de stijfheid van de ondersteuning. De bijbehorende frequentie van de dynamische contributie is afhankelijk van objectspecifieke eigenschappen en de snelheid, daarom kan de frequentie per situatie verschillen. Per eigenschap kan de frequentie van de dynamische excitatie worden bepaald aan de hand van de snelheid v en de golflengte λ_y , behorende bij de specifieke eigenschap met $f = v/\lambda_y$.

Lombaert e.a. merkt op dat wanneer alle wagons dezelfde karakteristieken hebben en spooroneffenheid resulteert in de maatgevende excitatie dat het spectrum van de dynamische contributies dezelfde vorm vertonen als het spectrum van de quasi-statische contributie [24].

2.2.2. Trillingen van goederentreinen

Jones en Block onderzocht laagfrequente trillingen van goederentreinen. Metingen zijn uitgevoerd op de dwarsbalk en 10 m vanaf het spoor in het vrije veld. Op beide locaties is tot 15 Hz de quasi-statische contributie maatgevend [26]. Een afname van de trillingssterkte van de quasi-statische contributie bij een toenemende afstand is waarneembaar. De meting op de dwarsbalk toont tot 15 Hz een maximale trillingssterkte van 140 dB weer. Op 10 m afstand van het spoor is dit afgenomen tot 95 dB.

Thompson beweert dat goederentreinen met zware aslasten, rijdend op een relatief lage rijnsnelheid, resulteren in trillingen met hoge sterkte bij het spoor [27]. Dit wekt golven op die zich verplaatsen over het grondoppervlak. In combinatie met zachte bodemkarakteristieken, kan een golf met een hoge amplitude zich verspreiden tot een orde van 100 m van het spoor [27]. Het significante deel van de respons van een goederentrein ligt vaak in de lage frequenties, onder de 10 Hz [27].

2.3. Toetsingskader

Negreira e.a. hebben de effectiviteit van verschillende criteria voor trillingshinder onderzocht. Het onderzoek bestaat uit vijf psycho-vibratie testen van houten vloeren die zijn uitgevoerd

in laboratoria op twee verschillende locaties [28]. Negreira e.a. concludeert dat de eerste eigenfrequentie de beste indicator is voor het aantonen dat trillingshinder wel of niet aanwezig is. "The Maximum Transient Vibration Value", dat afkomstig is uit de internationale standaard ISO 2631-1:1997 "Blootstelling aan mechanische trillingen en schokken op het menselijk lichaam"[29] blijkt de beste indicator voor het aantonen van de hoeveelheid trillingshinder. Deze methode beoordeelt de trillingshinder door gebruik te maken van het kwadratisch gewogen gemiddelde.

Een alternatief, opgesteld door Stichting Bouwresearch (SBR), is de richtlijn B: "Trillingen: meet- en beoordelingsrichtlijnen – hinder voor personen in gebouwen". Deze richtlijn geeft criteria voor het bepalen van trillingshinder aan de hand van een gewogen kwadratisch gemiddelde [30]. Het resultaat van dit gemiddelde is de voortschrijdende effectieve waarde, weergegeven in Vergelijking (2.4). De maximale voortschrijdende effectieve waarde mag niet hoger zijn dan een bepaalde streefwaarde. De te hanteren streefwaarde hangt af van de bouwfunctie, tijdstip van de trilling, en repetitie van de trilling.

Beide toetsingskaders maken gebruik hebben dezelfde theoretische achtergrond voor het beoordelen van trillingshinder. De SBR-richtlijn is voor Nederland een meer geschiktere methode, vanwege de grotere toepassing en de aanbeveling voor het gebruik van vanuit de Nationale bijlage van de Eurocode 5: Ontwerp en berekening van houtconstructies [31].

In deze paragraaf wordt summier toegelicht op welke manier het toetsen aan de SBR uitgevoerd dient te worden. Met behulp van de SBR kan de voortschrijdende effectieve waarde van een trilling worden berekend. Vergelijking (2.5) dient vergeleken te worden met streefwwaarden A_1 en A_2 . Als V_{max} kleiner dan A_1 is, wordt geacht dat geen trillingshinder aanwezig is. Als V_{max} binnen streefwwaarden A_1 en A_2 ligt, moet V_{per} , zoals gedefinieerd in (2.6), voldoen aan streefwaarde A_3 om aan de richtlijn van de SBR te voldoen. De streefwaarde A_1 tot en met A_3 zijn per dagdeel voor nieuwe en bestaande situaties weergegeven in Tabel 2.1. In Figuur 2.4 is het stappenplan van keuren aan de SBR weergegeven.

$$v_{eff}(t) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^t \exp(-\xi/\tau) v^2(t - \xi) d\xi} \quad (2.4)$$

Met:

$\tau = 0,125s$ – parameter voor een tijdsperiode;

t – variabele voor de tijd in [s];

ξ – integratie variabele voor de tijd in [s].

$$V_{max} = \max(v_{eff}(t)) \quad (2.5)$$

$$V_{per} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_{eff,max,30,i}^2} \cdot \sqrt{\frac{T_b}{T_o}} \quad (2.6)$$

Met:

n – een integer van het meetsignaal gedeeld door 30;

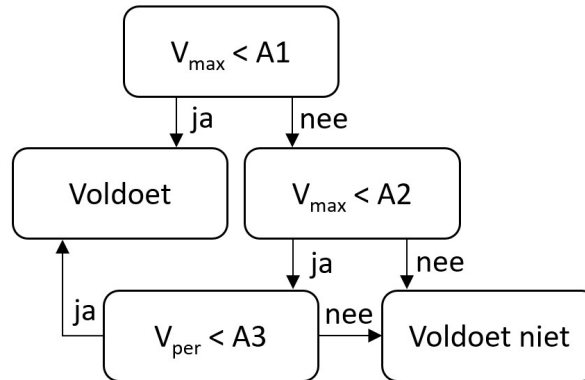
$v_{eff,max,30,i}$ – maximale voortschrijdende waarde per 30 seconden [-];

T_b – de totale bedrijfsduur van de trillingsbron in de beoordelingsperiode in [s];

T_o – beoordelingsperiode in [s].

Tabel 2.1: Streefwaarden woongebouw voor continue trillingen uit weg- en railverkeer

Situatie	Dag en avond			Nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Nieuw	0,1	0,4	0,05	0,1	0,2	0,05
Bestaand	0,2	0,8	0,1	0,2	0,4	0,1



Figuur 2.4: Stroomschema acceptatie trillingshinder

2.4. Ontwerpmaatregelen

Wanneer het ontwerp trillingsgevoelig blijkt te zijn, kunnen hiervoor verschillende ontwerpmaatregelen worden getroffen. De selectie van de verschillende maatregelen is gebaseerd op bewezen effectiviteit uit de literatuur en op de wiskundige benadering van de eigenfrequenties.

Allereerst is de polynoom voor het bepalen van de n^e eigenfrequentie ω_n op basis van de Timoshenko liggertheorie geanalyseerd (Zie Vergelijking (2.7)). Deze theorie beschrijft relaties tussen de verplaatsingen, spanningen en belastingen, waarbij zowel buigrek als afschuifrek is aangenomen. De randvoorwaarde komen overeen met een vrij opgelegde ligger. De materiaafhankelijke parameters (elasticiteitsmodulus E , glijmodulus G en afschuif-correctie factor k) worden buiten beschouwing gelaten. De dichtheid (ρ) is beschouwd voor het totaal trillende systeem, dit betekent dat niet alleen de dichtheid van het CLT-element is meegerekend, maar ook de overige permanente belasting op de vloer. De lengte van de overspanning l is gezien als parameter die het grootste effect heeft op de eigenfrequentie, vanwege de hoge exponent. Na het herschrijven van α^2 en r^2 in Vergelijkingen (2.8) en Vergelijking (2.9) is geconcludeerd dat een toename van de dichtheid (ρ) resulteert in een afname van α^2 , dat vervolgens resulteert in een afname van de eigenfrequentie. Een toename van de hoogte (h) resulteert in een toename van zowel α als r en dus in een toename van de eigenfrequentie.

$$\omega_n^4 \frac{\rho r^2}{kG} - \omega_n^2 \left(1 + \frac{n^2 \pi^2 r^2}{l^2} + \frac{n^2 \pi^2 r^2}{l^2} \frac{E}{kG} \right) + \frac{\alpha^2 n^4 \pi^4}{l^4} = 0 \quad (2.7)$$

$$\text{Met: } \alpha^2 = \frac{EI}{\rho A}, \quad r^2 = \frac{I}{A}$$

$$\alpha^2 = \frac{EI}{\rho A} \Rightarrow \frac{Ebh^3}{12\rho bh} \Rightarrow \frac{Eh^2}{12\rho} \quad (2.8)$$

$$r^2 = \frac{I}{A} \Rightarrow \frac{bh^3}{12bh} \Rightarrow \frac{h^2}{12} \quad (2.9)$$

Dat het veranderen van de dikte van het CLT-element effect heeft op trillingen, wordt ook geconcludeerd door Labonnote [16]. In haar onderzoek naar het effect van trillingshinder bij looptrillingen zijn verschillende parameters van een CLT-vloer met elkaar vergeleken op lokaal en globaal niveau. Het startpunt van het onderzoek is een vijf-laagse CLT-plaat met een dusdanige dikte dat het correspondeert met een vloer. De lokale parameters bestaan uit de totale dikte van het element, de verhouding van buitenste laagdikte ten opzichte van de totale plaatdikte (ratio R). Ook zijn verschillen in houtkwaliteit van zowel de buitenste als de binnenste lagen onderscheiden. Tot slot werd het verschil in de schuifmodulus onderzocht. De onderzochte globale parameters zijn: verschillende element breedtes, starre of scharnierende verbindingen tussen de platen onderling, de lengte van de overspanning en twee- of vierzijdige scharnierende oplegging.

Voor de lokale parameters blijkt dat de totale dikte van de plaat en de ratio-R van de buitenste laagdikte tot de totale plaatdikte het meeste invloed heeft op de trilling. Voor de globale parameters resulteert de overspanning in het meeste effect op de amplitude.

Omdat het onderzoek gespecificeerd is op looptrillingen, waarbij de respons van de trilling gebaseerd is op puntlasten op de vloer. Hierdoor zijn enkele ontwerpmaatregelen niet bruikbaar voor het huidige onderzoek. Desalniettemin is het resultaat van het type elementverbindingen wel meegenomen in huidig onderzoek. Tussen platen onderling blijkt een rotatievaste verbinding een lagere amplitude te hebben dan een rotatievrije verbinding. Daarom is in het huidige onderzoek deze ontwerpmaatregel ook toegepast, waardoor het model rotatievaste verbindingen heeft. De volgende ontwerpmaatregelen zijn in het onderzoek toegepast:

- Variëren van de totale plaatdikte
- Variëren van Ratio-R: (dikte van de buitenste houtlagen)
- Variëren van de overspanning
- Variëren van de overige permanente belasting
- Toepassen van rotatievrije en rotatievaste verbindingen.

3

Methodiek

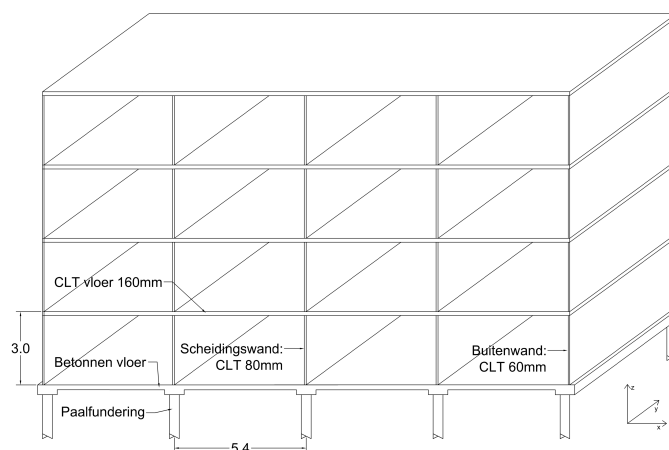
Hoofdstuk 3 beschrijft de methodiek waarmee voorspeld kan worden welke ontwerpmaatregelen zorgen voor een reductie van het risico op trillingshinder. Voor het bereiken van deze prognose worden eerst de uitgangspunten getoond, waardoor het mogelijk is om verschillende modellen met elkaar te vergelijken. Vervolgens wordt toegelicht, op welke manier trillingshinder wordt gemeten. De methode beschrijft ook de wijze waarop moet worden omgegaan met een trein-geïnduceerde trillen en een toetsingskader. De effectiefste ontwerpmaatregelen zijn bepaald door middel van eigenfrequentie analyses. Tot slot zijn de relevante invoerparameters en dynamische analyses behandeld van het eindig elementen model. Het model wordt gebruikt voor het vertalen van invoer naar uitvoer, voor zowel de methode als de casus.

3.1. Uitgangspunten

3.1.1. Algemene ontwerp uitgangspunten

Om verschillende modellen met elkaar te kunnen vergelijken is het belangrijk om overeenkomstige uitgangspunten vast te stellen. Dit begint met het vaststellen van de dimensies van het woongebouw. Het woongebouw bestaat uit vier beuken met vier woonlagen. De term beuken geeft het aantal stramienen aan waaruit het woongebouw bestaat. Op basis van advies van het architectenbureau Inbo en kennis van meerdere CLT-experts bedraagt de overspanning van de vloeren 5,4 m [32]. Voor het tegengaan van waterindringing bij de CLT-elementen, is de fundering en beganegrondvloer uitgevoerd in beton. De hoogte van iedere etage bedraagt 3 m en de diepte van het woongebouw is arbitrair vastgesteld op 10 m. De globale dimensies van het woongebouw zijn weergegeven in Figuur 3.1. Voor het bepalen van de dimensies van de vloeren en wanden is het noodzakelijk om uniforme belastingen te hanteren voor de verschillende modellen. Het woongebouw is onderworpen aan een gevolgklasse 2 berekening, in overeenstemming met de Eurocode 0: Grondslag van het constructief ontwerp [33]. De veranderlijke belasting op de verdiepingsvloeren is bepaald volgens de Eurocode 1: belastingen op constructies [34]. De windbelasting op de buitenmuren is vastgesteld in overeenstemming met Eurocode 1 in windgebied klasse I, onbebouwd gebied [35]. Bovendien is rekening gehouden met akoestische overwegingen. Naast het eigengewicht is ook de permanente belasting in rekening gebracht voor de verdiepingsvloeren. Deze belasting weerspiegelt een zwevende dekvloer die bestaat uit isolatiemateriaal en een cementbetonnen afdekvloer. De modelbelastingen zijn weergegeven in Tabel 3.1.

De dikte van de vloerelementen is bepaald op basis van de buigspanning in de uiterste grenstoestand (UGT) en de doorbuigingstoets in de bruikbaarheidsgrenstoestand (BGT). De wanddiktes zijn gebaseerd op de axiale spanning en buigspanningen in de UGT. Hierbij is



Figuur 3.1: Schematisatie CLT-ontwerp

Tabel 3.1: Overzicht belastinggevallen

Belastinggevallen	Permanent	Veranderlijk	
Eigengewicht	$G_{k,1}$		kN/m^2
Wind		$Q_{k,1} = 1.40$	kN/m^2
Verdiepingsvloer	$G_{k,2} = 1,265$	$Q_{k,2} = 1.75$	kN/m^2

een vermindering van de axiale spanning in rekening gebracht als gevolg van knik toegepast. Om rekening te houden met akoestische detaillering zijn modellen uitgevoerd met enkele of dubbele scheidingswanden tussen woningen en wel of geen doorlopende vloer. Dit betekent dat een model met dubbele scheidingswanden en geen doorlopende vloer gezien wordt als één beuk. Modellen met een enkele scheidingswand en een doorlopende vloer zijn gesimuleerd als een dubbele beuk. Richtlijnen met betrekking tot trillingen zijn niet meegenomen in de toetsing van de hoofdconstructie. Hierdoor wordt voorkomen dat het model vooraf voldoet aan de trillingseisen en dat de maatregelen overbodig worden.

3.1.2. Uitgangspunten referentiemodel CLT

Het ontwerp van het CLT bestaat uit drie afzonderlijke elementen: de vloer, de binnenwand en de buitenwand. Om de buigstijfheid en interne spanningen te berekenen, is de Gamma-methode gebruikt. Met behulp van deze methode zijn de interne krachten en verplaatsingen bepaald op basis van de Euler-Bernoulli theorie. In Tabel 3.2 zijn de eigenschappen van het CLT weergegeven die zijn gebruikt bij het ontwerp van het CLT.

De UGT-toets voor de vloeren is gebaseerd op de maximale spanning in de doorsnede (zie Vergelijking (3.1)) die kleiner moet zijn dan de buigsterkte van het hout. De spanning is per longitudinale houtlaag berekend en is in twee delen gesplitst. Deze twee delen zijn in formulevorm weergegeven in Vergelijking (3.2). Het eerste deel berekent de spanning in het midden van iedere longitudinale houtlaag. De γ -factor is in rekening gebracht als gevolg van rol-afschuifspanning. Het tweede deel berekent per longitudinale laag de spanning in de uiterste vezel. De sommatie van deze twee componenten resulteert in het spanningsverloop van de totale doorsnede. Figuur 3.2 illustreert het spanningsverloop van een CLT-doorsnede. Hierbij zijn de twee spanningscomponenten $\sigma_{i,c/t}$ en $\sigma_{i,m}$ weergegeven.

Tabel 3.2: Materiaaleigenschappen CLT met houtkwaliteit C24

Eigenschappen	Symbol	Waarde	
Elasticiteitsmodulus [21]	$E_{0,gem}$	11000	N/mm ²
Glijmodulus [21]	$G_{0,gem}$	690	N/mm ²
Rol-afschuifmodulus [21]	$G_{R,gem}$	50	N/mm ²
Dichtheid [21]	ρ	450	kg/m ³
Buigspanning [31]	$f_{m,k}$	24	N/mm ²
Drukspanning [31]	$f_{c,0,k}$	21	N/mm ²
Modificatie factor [21]	k_{mod}	0,8	-
Factor systeem werking [21]	k_{sys}	1,1	-
Materiaal factor [31]	γ_M	1,3	-

Voor de maximaal opneembare buigspanning zijn materiaal en systeem factoren meegenomen. CLT is beschouwd als een massief houten product. Dit resulteert in een modificatiecoëfficiënt van 0,8 [21]. Door het meewerken van de transversale houtlagen, wordt de longitudinale last gespreid over de breedte. Als gevolg mag de last worden gereduceerd en is een systeemfactor in rekening gebracht [21].

De wanden zijn zowel belast in normale en longitudinale richting. Daarom is niet alleen gedimensioneerd op basis van de doorsnede-toetsing, maar ook op stabiliteit. De UGT-toets voor axiale en loodrecht op de plaat belaste elementen is beschreven in Vergelijking (3.3).

$$\sigma_{m,d} = \max\{|\sigma_{i,c/t} \pm \sigma_{i,m}|\} \leq f_{m,d} = k_{sys} \cdot k_{mod} \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} \quad (3.1)$$

Met:

$\sigma_{m,d}$ – rekenwaarde van de optredende spanning op basis van buiging;

$\sigma_{i,c/t}$ – axiale druk(c)- of trekspanning(t) per longitudinale houtlaag i ;

$\sigma_{i,m}$ – spanning per longitudinale houtlaag i op basis van buiging;

$f_{m,d}$ – rekenwaarde voor de toelaatbare houtspanning op basis van buiging.

$$\sigma_{i,c/t} = \frac{M_{ed}}{EI_{eff}} \gamma_i E_i a_i \quad \sigma_{i,m} = \frac{M_{ed}}{EI_{eff}} \frac{E_i h_i}{2} \quad (3.2)$$

Met:

M_{ed} – rekenwaarde van het optredende buigende moment [kNm];

EI_{eff} – effectieve buigstijfheid van de totale doorsnede [Nmm²];

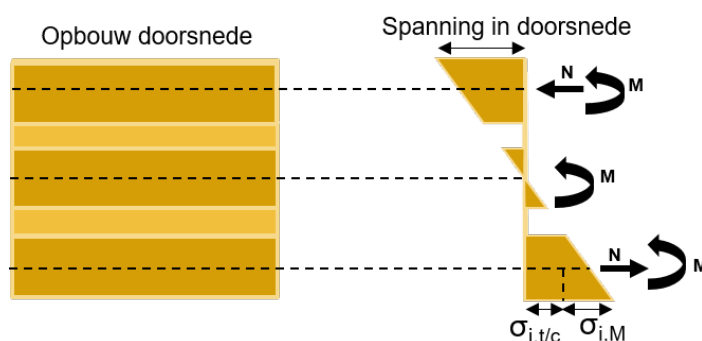
γ_i – gamma-factor per longitudinale houtlaag i [-];

E_i – elasticiteitsmodulus per longitudinale houtlaag i [N/mm²];

a_i – afstand van het zwaartepunt per longitudinale houtlaag i tot het zwaartepunt van de totale doorsnede [mm];

h_i – laagdikte per longitudinale houtlaag i [mm].

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \frac{N_{ed}}{k_{c,y} \cdot A_{net} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (3.3)$$



Figuur 3.2: Spanningsverloop CLT-plaat op basis van de Gamma-methode

Met:

$\sigma_{c,0,d}$ – rekenwaarde van de optredende axiale spanning in longitudinale richting;

$k_{c,y}$ – knik-factor;

$f_{c,0,d}$ – rekenwaarde voor de toelaatbare axiale houtspanning in longitudinale richting;

N_{ed} – rekenwaarde van de optredende axiale kracht;

A_{net} – netto oppervlak van de doorsnede; op basis van de longitudinale lagen.

Ook de doorbuigingstoets is berekend aan de hand van de Euler-Bernoulli theorie. Conform de Eurocode 5 is rekening gehouden met drie verschillende situaties: de initiële situatie, de eindfase en de quasi permanente eindfase. Op basis van de toetsing in de UGT en BGT zijn voor de CLT-elementen de plaatdiktes bepaald. Tabel 3.3 geeft een overzicht weer van deze diktes. De plaatconfiguratie van de CLT-elementen is schematisch weergegeven in Figuur 3.3. De unity checks (u.c.) geven de marge aan tussen de optredende belasting en de opneembare capaciteit van het element. Hoe dichterbij 1,0, hoe minder marge het element heeft. De unity check is gedefinieerd zoals Vergelijking (3.4). Zie Bijlage A voor de volledige berekening van de CLT vloeren en wanden.

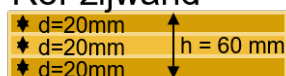
$$u.c. = \frac{\text{optredende spanning}}{\text{opneembare spanning}} \quad (3.4)$$

Tabel 3.3: Overzicht CLT-elementen

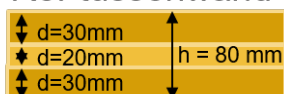
Beschrijving	plaatdikte	configuratie	u.c. UGT	u.c. BGT
Vloer element	160 mm	40 20 40 20 40	0,29	0,97
Enkele tussenwand	80 mm	30 20 30	0,65	-
Buitenwand	60 mm	20 20 20	0,90	-

Diktes referentiemodel CLT

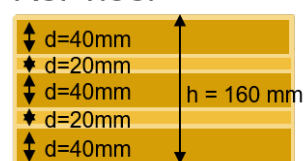
Ref-zijwand



Ref-tussenwand



Ref-vloer



Figuur 3.3: Overzicht plaatconfiguratie van CLT-elementen

Vanuit de praktische toepasbaarheid van dit onderzoek zijn plaatconfiguraties gebruikt die beschikbaar zijn bij verschillende leveranciers. Hierbij is gekozen om per aantal plaatlagen de maximale plaatconfiguratie te kiezen. Deze plaatconfiguraties zijn weergegeven in Figuur 3.4 voor een 3-, 5-, 7- en 9-laagse CLT-plaat.

Maximale plaatdiktes CLT



Figuur 3.4: Overzicht van maximale praktische plaatconfiguratie per aantal CLT-lagen

3.1.3. Uitgangspunten referentiemodel beton

Behalve een gebouw van CLT is ook een betonnen gebouw beschouwd. Omdat beton een conventionele bouwmethode is, is het betonnen ontwerp gebruikt om de resultaten van het CLT-ontwerp te vergelijken. Voor het betonnen ontwerp zijn voor zover mogelijk dezelfde uitgangspunten gehanteerd als het CLT-ontwerp. De gehanteerde eigenschappen voor het betonmodel zijn getoond in Tabel 3.4.

Tabel 3.4: Materiaaleigenschappen beton met kwaliteit C30/37

Eigenschappen	Symbol	Waarde
Elasticiteitsmodulus ongescheurd	$E_{ongescheurd}$	33000 N/mm ²
Elasticiteitsmodulus gescheurd	$E_{gescheurd}$	15000 N/mm ²
Dichtheid	ρ	2500 kg/m ³
Drukspanning	$f_{c,k}$	30 N/mm ²
Trekspanning	f_{ctm}	2,9 N/mm ²

Voor de toetsing van de dimensies van de betonvloeren en -wanden is gebruik gemaakt van de programma's Technosoft Raamwerken voor de toetsing van de vloeren op buiging en Technosoft Kolomwapening voor de toetsing van de kolommen op axiale belasting, buiging en knik. In de UGT is uitgegaan van gescheurd beton. Hierdoor is de elasticiteitsmodulus gereduceerd. Middels itereren van de hoogte en wapeningsconfiguratie is een dusdanige capaciteit gecreëerd, zodat de u.c. kleiner is dan 1,0. De BGT-toets voor het betonnen model is ook uitgevoerd voor de initiële situatie, de eindfase en de quasi-permanente eindfase. De diktes van de betonelementen zijn weergegeven in Tabel 3.5 met de bijbehorende u.c. In de tabel is behalve de dikte ook de wapeningsconfiguratie aangegeven. Hierbij zijn boven (b) en onder (o) netten opgegeven. Het eerste cijfer refereert naar de diameter en het tweede cijfer naar de hart-op-hart afstand van de wapeningsstaven. Zie de volledige berekening in Bijlage A.

Tabel 3.5: Overzicht betonnen elementen

Beschrijving	Plaatdikte	Wap. config.	u.c. UGT	u.c. BGT
Vloer element	210 mm	net Ø10-150 o/b	0,86	0,92
Tussenwand	100 mm	net Ø8-150 o/b	0,78	-
Buitenwand	100 mm	net Ø8-150 o/b	0,50	-

3.2. Effect van trillingshinder bij trein-geïnduceerde trillingen

Het effect van trillingshinder wordt beoordeeld door de respons van de vloeren van het woongebouw te toetsen aan een methode die specifieke waarden opstelt waarmee trillingshinder concreet wordt gemaakt. De SBR richtlijn-B stelt streefwaarden waarbij dit is gedaan. Deze geeft drie streefwaarden; A_1 , A_2 en A_3 . De SBR richtlijn-B maakt met de streefwaarden onderscheid tussen verschillende gebruiksfuncties. Vanwege het woongebouw dat is onderzocht, worden streefwaarden aangehouden met de functie wonen. Ook maakt de richtlijn onderscheid in twee situaties. In de nieuwe situaties gaat het om een nieuwe bron en nieuwe ontvanger. Bij bestaande situaties gaat het om een bron of ontvanger ouder dan 3 maanden. Hierbij is uitgegaan van een enige vorm van gewinning. Beide situaties worden gedurende de toetsing in beschouwing genomen. Als de maximale voortschrijdende waarde lager is dan streefwaarde A_1 dan voldoet het gebouw aan de richtlijn en is de kans op trillingshinder minimaal. Ligt de maximale voortschrijdende effectieve waarde tussen streefwaarden A_1 en A_2 , dan dient de trillingssterkte over de hele beoordelingsperiode lager te zijn dan streefwaarde A_3 . Als aan deze voorwaarde niet kan worden voldaan of wanneer de maximale voortschrijdende waarde groter dan A_2 is, dan voldoet het model niet aan de SBR en is de kans op trillingshinder in zekere mate aanwezig.

3.3. Trein-geïnduceerde trilling

Voor toetsing van de methode voor het voorspellen van trillingshinder dient een trein-geïnduceerde trilling als invoer aan het eindig elementen programma toegevoegd te worden. Deze excitatie dient representatief te zijn voor de locatie. Dit betekent dat de frequentie-informatie van de trilling overeen moet komen met een maatgevende situatie van de desbetreffende locatie. Het spectrum van de maatgevende situatie dient vergeleken te worden met de omhullende frequentierespons. Hierdoor kan een prognose voor trillingshinder worden opgesteld. Ook dient de excitatie zodanig te zijn gemeten of gesimuleerd dat deze representatief is voor een excitatie tegen de fundering aan.

Wanneer het maatgevende tijdsignaal van de trein-geïnduceerde trilling is toegevoegd aan het eindig elementen model wordt met een lineaire tijdsafhankelijke analyse de vloertrilling bepaald. De vloertrilling met de grootste amplitude wordt als maatgevend beschouwd en wordt gebruikt voor het toetsen van trillingshinder.

3.4. Toetsingskader

Voor het toetsen van de methode wordt, voor locaties in Nederland, geadviseerd de SBR richtlijn-B te hanteren. Op basis van een trilling in het tijdsdomein beschrijft deze richtlijn een mathematisch stappenplan om de trilling te vertalen naar een waarde waarmee trillingshinder wordt aangeduid. Voor dit onderzoek wordt de maatgevende vloertrilling gebruikt als invoer. Met het vergelijken van de waarde voor trillingshinder en de streefwaarden wordt het effect van verschillende ontwerpmaatregelen op trillingshinder bij een trein-geïnduceerde trilling getoetst.

3.5. Ontwerpmaatregelen

De effectiviteit van de beschreven ontwerpmaatregelen voor Hoofdstuk 2 zijn getoetst door middel van een eigenfrequentie analyse. De maatregelen die de sterkste trend in de eigenfrequentie tonen, zijn beschouwd als effectiefst. De analyse is uitgevoerd door gebruik te maken van analytische en numerieke modellen. Vanwege de indicatieve aard van de analyse zijn eenvoudige liggermodellen gebruikt. De effectiefste ontwerpmaatregelen zijn geïmplementeerd in het eindig elementen model. Bij de analyses is onderscheid gemaakt tussen ontwerpmaatregelen die effect hebben op een enkele vloer en op een systeem van vloeren en wanden. Dit is vertaald naar balk- en raamwerkmodellen. De modellen maken gebruik van de effectieve hoogte. Dit resulteert in een lagere massa van de daadwerkelijke doorsnede. Hierom is de massa in het model gecompenseerd.

3.5.1. Ontwerpmaatregelen – balkmodel

Bij de balkmodellen is de eigenfrequentie analytisch bepaald conform Vergelijkingen (3.5) en Vergelijking (3.6). Hierbij is onderscheid gemaakt tussen scharnierende en ingeklemde steunpunten. De balkmodellen laten voornamelijk het effect op de eigenfrequentie zien bij variërende doorsnede-eigenschappen. Het effect op de eigenfrequentie bij het variëren van de overspanning is ook onderzocht. Dit effect is van toepassing op de hele vloer.

$$f_{\text{scharnierend}} = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI_{\text{eff}}}{m}} \quad (3.5) \quad f_{\text{ingeklemd}} = \frac{3\pi}{8L^2} \sqrt{\frac{EI_{\text{eff}}}{m}} \quad (3.6)$$

Met:

L – overspanningslengte [m];

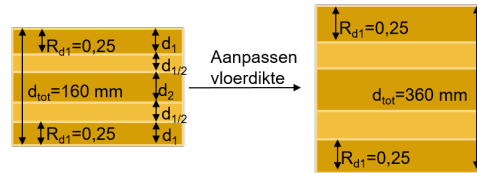
m – massa, beschreven als $m = \rho A + \frac{1000G_k}{9,81}$ [kg/m¹].

Voor de balkmodellen zijn vier ontwerpmaatregelen vergeleken met het referentiemodel. Per ontwerpmaatregel is een model gemaakt. De bijbehorende naamgeving bestaat uit 'EB', dat staat voor 'Eenvoudige Balkmodel' met daarachter een 'R' of een getal, bijvoorbeeld '3', dat refereert aan het referentiemodel of de derde ontwerpmaatregel.

Het referentiemodel (EBR) heeft een overspanning van 5,4 m en een plaatdikte van 160 mm. In de opvolgende modellen is telkens één parameter aangepast door het toepassen van een vermenigvuldigingsfactor. Hierdoor is enkel de invloed van de desbetreffende parameter bestudeerd. Deze factor varieert van 0,5 tot en met 3.

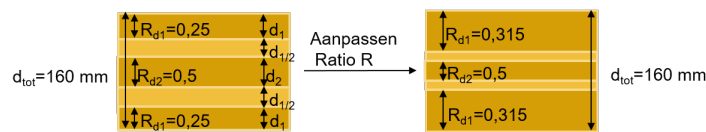
De eerste parameter betreft de vloerdikte (EB1). Hierbij is iedere houtlaag met dezelfde vermenigvuldigingsfactor vergroot. Op deze manier is gewaakt dat het aandeel van de buitenste lagen ten opzichte van de totale plaatdikte gelijk blijft. Het aanpassen van de totale hoogte heeft zowel effect op de stijfheid van de doorsnede als op de massa. Het aandeel van de stijfheid en de massa op de eigenfrequentie is bij het vergroten van de hoogte met factor a respectievelijk $a^{1,5}$ en $a^{-0,5}$. Figuur 3.5 illustreert de manier waarop de plaatdikte is aangepast bij een vermenigvuldigingsfactor van 2,25.

Als volgt is bij het tweede model (EB2) de parameter R aangepast. Deze parameter geeft de verhouding van de buitenste laagdikte ten opzichte van de totale plaatdikte weer. In het referentiemodel bedraagt deze ratio (R_{d1}) 0,25. In Vergelijking (3.7-3.8) zijn de definities weergegeven waarmee de buitenste longitudinale houtlagen (d_1), de middelste longitudinale houtlaag (d_2) en de twee transversale houtlagen ($d_{1/2}$) zijn bepaald aan de hand van de ratio R. Hierbij is ook een verhouding opgenomen voor de verdeling van de middelste laagdikte ten opzichte van de twee transversale tussenlagen ($R_{d2-d1/2}$). Deze ratio bedraagt 0,5 met als



Figuur 3.5: Illustratie van de plaatconfiguratie bij het aanpassen van de plaatdikte

gevolg dat de transversale lagen tweemaal zo dun zijn als de middelste longitudinale laag. De maximale hanteerbare vermenigvuldigingsfactor voor de parameter R bedraagt een factor van 2,0. Vanaf dit punt is de laagdikte van de twee buitenste lagen even groot als de totale plaatdikte. Het variëren van deze parameters heeft effect op de stijfheid van de doorsnede. Ter verduidelijking zie Figuur 3.6 waarin de ratio R van een CLT-doorsnede is aangepast bij een vermenigvuldigingsfactor van 1,5.



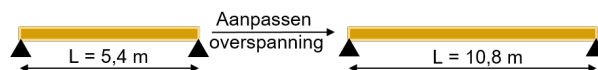
Figuur 3.6: Illustratie van de plaatconfiguratie bij het aanpassen van de ratio R

$$d_1 = d_{tot} \cdot R_{d1} \quad (3.7)$$

$$d_2 = d_{tot} \cdot (1 - R_{d1}) \cdot R_{d2-d1/2} \quad (3.8)$$

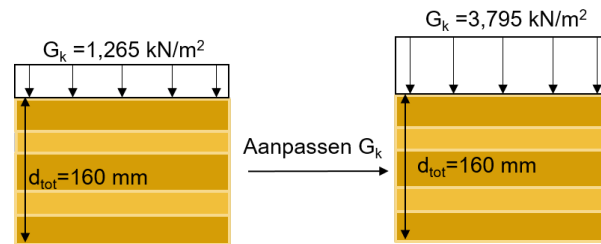
$$d_{1/2} = d_{tot} \cdot (1 - R_{d1}) \cdot (1 - R_{d2-d1/2})/2 \quad (3.9)$$

Ten derde is het effect van de overspanning op de eigenfrequentie van de vloeren onderzocht met model (EB3). In het referentiemodel is een overspanning van 5,4 m gehanteerd. Op deze lengte is de vermenigvuldigingsfactor toegepast. De variatie van de overspanning resulteert in een variatie van de stijfheid van het balkmodel. Ter illustratie weergeeft Figuur 3.7 de aanpassing van de overspanning op het model bij een factor van 2.



Figuur 3.7: Illustratie van de plaatconfiguratie bij het aanpassen van de overspanning

Als laatste ontwerpmaatregel voor de balkmodellen is het effect van een variërende permanente belasting vergeleken in model (EB4). Hierbij is de permanente belasting, zonder eigen gewicht gehanteerd. Het aanpassen van de permanente belasting heeft effect op de massa van de doorsnede. Figuur 3.8 geeft illustratief de aanpassing van de permanente belasting op de doorsnede weer bij een vermenigvuldigingsfactor van 3. Een overzicht van de verschillende modellen is weergegeven in Tabel 3.6.



Figuur 3.8: Illustratie van de plaatconfiguratie bij het aanpassen van de permanente belasting

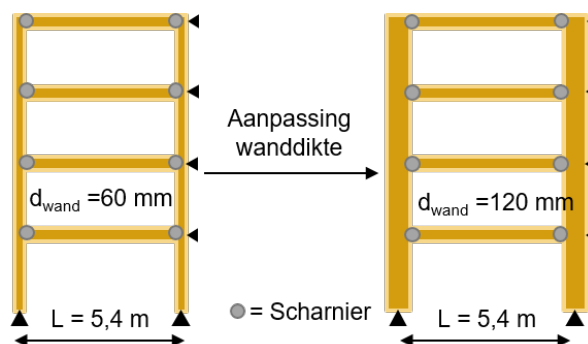
Tabel 3.6: Verschillende ligger modellen met gewijzigde parameters

Model nummer	Dikte vloer [m]	Ratio R [-]	Overspanning [m]	Permanente belasting [kN/m ²]
EBR	0,160	0,25	5,4	1,265
EB1	variabel	0,25	5,4	1,265
EB2	0,160	variabel	5,4	1,265
EB3	0,160	0,25	variabel	1,265
EB4	0,160	0,25	5,4	variabel

3.5.2. Ontwerpmaatregelen – raamwerkmodel

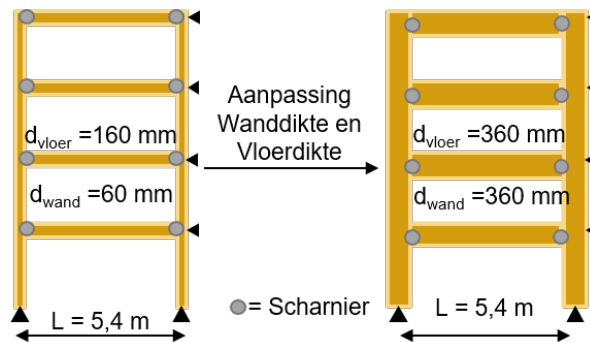
De raamwerkmodellen zijn gebruikt om het effect van de ontwerpmaatregelen op het systeem te analyseren. De plaatdiktes zijn gehanteerd zoals in Tabel 3.3. Het model wordt geschoord, ter simulatie van een horizontale stabiliteitsconstructie. Wederom is gekeken naar de eigenfrequenties van vloeren.

De naamgeving 'ER' van de raamwerkmodellen heeft betrekking op 'Eenvoudige Raamwerkmodel'. Het referentie-raamwerkmodel (ERR) bestaat uit één vierlaagse beuk met dimensies conform Sectie 3.1.1. Identiek aan de balkmodellen betreft de eerste parameter de vloerdikte (ER1). Vervolgens is het effect van de wanddikte beschouwd (ER2), hierbij zijn de vloeren en wanden ingeklemd gehanteerd. Ter illustratie is de aanpassing schetsmatig weergegeven in Figuur 3.9.



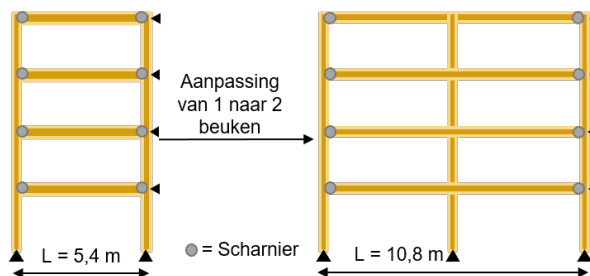
Figuur 3.9: Illustratie van het aanpassen van de wanddikte

In raamwerkmodel ER3 is een combinatie beschouwd van het verdikken van de vloeren bij verschillende wanddiktes. Hierbij zijn de vloeren ingeklemd gehanteerd. Ter illustratie is de aanpassing schetsmatig weergegeven in Figuur 3.10.



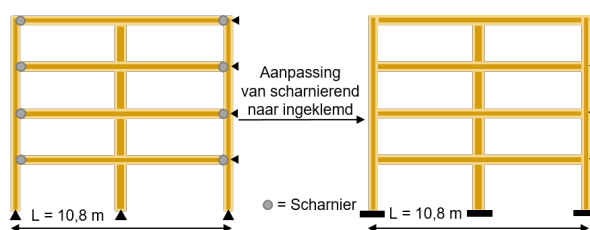
Figuur 3.10: Illustratie van het aanpassen van de vloer- en wanddikte

Het derde model (ER4) bestaat uit twee beuken met een totale breedte van 10,8 m. De vloeren bij de buitenwanden zijn aan weerszijde scharnierend gemodelleerd. De enkele woning scheidende wand is gemodelleerd als een 3-laagse CLT-wand met een breedte van 80 mm. Ter illustratie is de aanpassing schematisch weergegeven in [Figuur 3.11](#).



Figuur 3.11: Illustratie van het aanpassen van een enkele naar een dubbele beuk met scharnierende vloeren

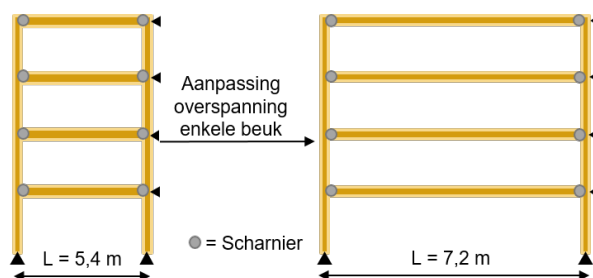
In model ER5 is één stap verder gegaan en zijn de vloeren aan de buitenzijde ingeklemd gemodelleerd in plaats van scharnierend in model ER4. Ter illustratie is de aanpassing schematisch weergegeven in [Figuur 3.12](#).



Figuur 3.12: Illustratie van het aanpassen een dubbele scharnierde beuk naar een ingeklemde dubbele beuk

Tot slot is de variëteit in overspanningslengte van het CLT-raamwerk bekeken in het raamwerkmodel ER6. In [Tabel 3.7](#) zijn de verschillende raamwerk modellen weergegeven. Ter illustratie is de aanpassing schematisch weergegeven in [Figuur 3.13](#).

Op basis van de analyse is het effect van de ontwerpmaatregelen voor de balkmodellen en raamwerkmodellen geanalyseerd. De volledige analyse is weergegeven in [Bijlage B](#). Voor balkmodellen blijken voornamelijk de totale plaatdikte en de overspanning een significant effect te hebben op de eigenfrequentie. Bij de raamwerkmodellen zijn de effectiefste ontwerpmaatregelen: het variëren van de vloerdikte, het variëren van de wanddikte, het variëren van



Figuur 3.13: Illustratie van het aanpassen van de overspanning bij een enkele beuk

Tabel 3.7: Verschillende raamwerk modellen met gewijzigde parameters

Model nummer	Beschrijving parameter
ERR	Referentiemodel
ER1	Variërende vloerdikte
ER2	Variërende wanddikte
ER3	Variërende vloer- en wanddikte
ER4	Twee beuken met scharnierende vloeren
ER5	Twee beuken momentvaste vloeren
ER6	Variërende overspanning

de overspanning en de combinatie van vloer- en wanddikte. De ontwerpmaatregel van de combinatie vloer- en wanddikte resulteert in buigende momenten bij de vloer-wandaansluiting die dusdanig groot zijn dat de uitvoering hiervan kostbaar is. Daarom is deze ontwerpmaatregel niet toegepast in dit onderzoek. Ontwerpmaatregelen die op basis van de analyse wel zijn toegepast in het onderzoek: het variëren van de vloerdikte, het variëren van de wanddikte en het variëren van de overspanning.

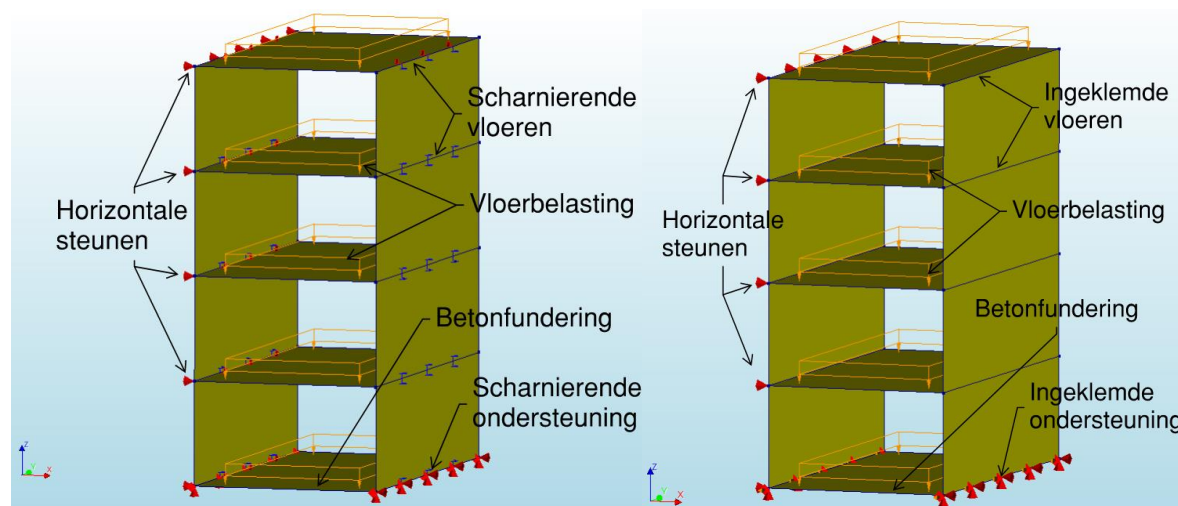
3.6. Eindig elementen model

Voor het converteren van een trillingen naar de gewenste uitvoer is gebruik gemaakt van een eindig elementen model (eem), waarin het woongebouw is gemodelleerd met numerieke plaat-elementen. Om de gewenste uitvoer te genereren zijn twee dynamische analyses toegepast. Het numerieke plaatmodel is complexer dan een balk- of raamwerkmodel bestaande uit ligger elementen. Als gevolg dienen meer invoerparameters te worden gedefinieerd. Daarom zijn de relevante parameters voor de geometrie, de materialen, de demping, de belastingen en de dynamische analyses nader toegelicht.

3.6.1. Geometrie

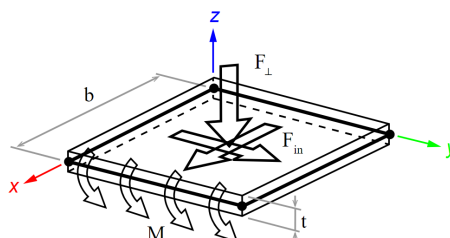
De numerieke plaatmodellen bestaan uit dimensies voor CLT en beton zoals beschreven in Paragraaf 3.1.2 en Paragraaf 3.1.3. Figuur 3.14 geeft de geometrie van het scharnierende en ingeklemde numerieke plaatmodel weer. Hierop is te zien dat de modellen horizontaal zijn geschoord. De vloeren van het CLT-model zijn scharnierend opgelegd aan de wanden. Bij de betonmodellen is onderscheid gemaakt tussen modellen met scharnierende en ingeklemde vloeren, omdat beide typen vloeraansluiten in de praktijk voorkomen. De onderste vloer betreft een betonnen funderingsvloer met een hoogte van 250 mm.

De wanden en vloeren zijn gemodelleerd met schaalementen. Deze elementen zijn geschikt voor het beschrijven van interne krachten op basis van belastingen in en uit het vlak. Het gekozen schaalement, weergegeven in Figuur 3.15, is berekend volgens de Mindlin-Reissner



Figuur 3.14: Overzicht geometrie plaatmodellen, links scharnierend, rechts ingekleemd

theorie.



Figuur 3.15: Numeriek schaalement met daarbij de mogelijk opneembare belastingen aangegeven.

3.6.2. Materiaal

In de numerieke modellen is gebruikgemaakt van twee soorten materialen: beton en CLT. Beton is isotroop ingevoerd. De betonwanden zijn ongescheurd en de betonvloeren zijn gescheurd gemodelleerd. Dit betekent dat voor de vloeren is gerekend met een gereduceerde elasticiteitsmodulus conform Tabel 3.4. CLT is ingevoerd als een orthotroop materiaal vanwege de ongelijkmatige verdeling van houtlagen in longitudinale en transversale richting. Orthotropie is aan het materiaal toegekend door de constitutieve vergelijking aan te passen middels het wijzigen van \mathbf{C}_{CLT} -matrix. In bijlage D zijn de formules en de uitwerking daarvan weergegeven waarmee de gewijzigde matrix tot stand is gekomen.

3.6.3. Demping

Voor de dynamische analyses is demping aan het model toegevoegd. Afhankelijk van welk type analyse is uitgevoerd, is óf modale demping óf Rayleigh-demping toegepast. Het toepassen van demping is essentieel, omdat zonder demping enerzijds het model numeriek instabiel wordt tijdens een frequentierespons analyse. Anderzijds geeft een model met proportionele demping een reëlere benadering voor de berekening van een numerieke trilling op de constructie.

Rayleigh-demping bestaat uit een lineaire combinatie van de massa- en stijfheidsmatrix en zijn middels de massa-proportionele en stijfheid-proportionele Rayleigh-coëfficiënten (α) en

(β) aan de dempingsmatrix gerelateerd, zoals weergegeven in Vergelijking (3.10). Ook is een relatie aanwezig tussen de modale demping (ξ) en de Rayleigh coëfficiënten. Deze vergelijking is weergegeven in Vergelijking (3.11).

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K} \quad (3.10)$$

Met:

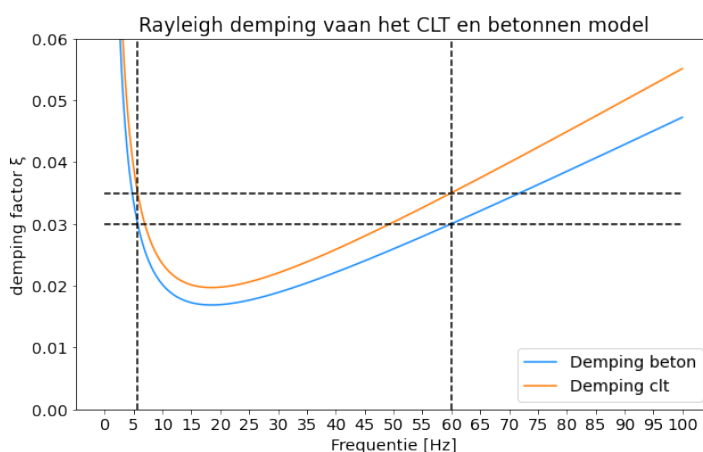
- \mathbf{C} – dempingsmatrix;
- α – massa-proportionele dempingsfactor;
- β – stijfheid-proportionele dempingsfactor.

$$\xi_n = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_n} + \beta \omega_n \right) \quad (3.11)$$

Met:

- ξ_n – modale demping van de n^e mode;
- ω_n – hoekfrequentie van de n^e mode.

Voor CLT en beton is uitgegaan van 2,5% [36] en 2% [37] materiaaldemping. Bovenop materiaaldemping is 1% demping die afkomstig is van meubilair bij het gebruik van de woning in rekening gebracht [37]. De Rayleigh-coëfficiënten zijn zodanig bepaald dat Rayleigh-demping op 5,7 Hz en 60 Hz gelijk is aan modale demping voor CLT en beton. Dit bereik is zodanig gekozen dat de frequenties binnen dit domein in mindere mate worden gedempt. In Figuur 3.16 is de modale demping op basis van de Rayleigh-coëfficiënten afgezet tegen de frequentie. Een overzicht van de toegepaste modale demping en Rayleigh-coëfficiënten is weergegeven in Tabel 3.8.



Figuur 3.16: Modale demping op basis van de Rayleigh coëfficiënten uit Tabel 3.8 afgezet tegen de frequentie.

Ondanks dat expliciet is gekozen voor 3,5% en 3% demping, is een aanvullend onderzoek uitgevoerd dat de gevoeligheid van demping op het model weergeeft. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de gevoeligheid van demping bij de frequentierespons analyse en de lineaire tijdsafhankelijke analyse. In bijlage C is het onderzoek te lezen.

Tabel 3.8: Overzicht toegepast demping per analyse

Type materiaal	modale demping ξ [%]	Rayleigh demping α []	Rayleigh demping β
CLT	3,5	2,289	1,453E-4
Beton	3	1,962	1,696E-4

3.6.4. Belastingen

Voor de numerieke modellen zijn de belastingen voor de verdiepingvloeren gehanteerd conform Tabel 3.1. Deze belastingen zijn beschouwd in de quasi-permanente situatie. Voor het uitvoeren van de dynamische analyses is aan de fundering een excitatie aangebracht met een amplitude van 1 mm/s. De grootte van de waarde is zodanig gekozen dat de excitatie te relateren is aan een trein-geïnduceerde trilling. Afhankelijk van het type analyse is een tijds- of frequentieafhankelijke factor op de excitatie toegepast.

3.6.5. Ontwerpmaatregelen

De effectiefste ontwerpmaatregelen afkomstig van de analyse beschreven in Paragraaf 3.5 zijn in het eindig elementen model geïmplementeerd. Ook is een additionele ontwerpmaatregel toegevoegd. Het toevoegen van tussenwanden is een ontwerpmaatregel die in een 3-dimensionale model toegevoegd moet worden om het effect aan te kunnen tonen. De methode voor het bepalen van de effectiefste maatregelen bestaat uit 2-dimensionale modellen en is daarom niet geschikt voor deze additionele maatregel.

Vloerdikte

Vloeren met diktes van 125%, 175% en 225% ten opzichte van het referentiemodel zijn gehanteerd. De plaatdiktes voor de CLT- en betonnen modellen zijn weergegeven in Tabel 3.9. Een verhoging van 225% van de betonvloer is niet beschouwd. Dit resulteert in een vloerdikte van 472,5 mm. Voor woningbouw is deze vloerdikte niet reëel.

Model	CLT	Beton scharnierend	Beton ingeklemd
Vloerdikte	[mm]	[mm]	[mm]
125%	200	262,5	262,5
175%	280	367,5	367,5
225%	360	-	-

Tabel 3.9: Gehanteerde plaatdiktes per type model voor de ontwerpmaatregel: Vloerdiktes

Wanddiktes

Voor het CLT-model zijn wanddiktes van 120 mm en 200 mm gehanteerd. Dit is overeenkomend met een 3-laagse en 5-laagse CLT-plaat. Bij de betonnen modellen zijn wanddiktes van 200 mm en 333 mm gehanteerd, wederom met overeenkomende procentuele toenames al bij de CLT-modellen.

Model	CLT	Beton scharnierend	Beton ingeklemd
Wanddikte	[mm]	[mm]	[mm]
200%	120	200	200
333%	200	333	333

Tabel 3.10: Gehanteerde plaatdiktes per type model voor de ontwerpmaatregel: Wanddiktes

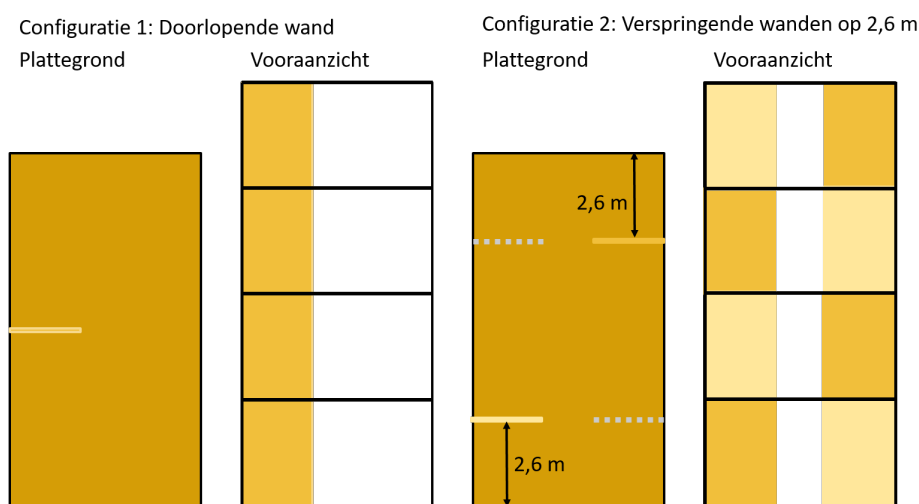
Overspanning

Bij de ontwerpmaatregel 'Overspanning' is de overspanning verkleind en vergroot. Hiervoor zijn lengtes van respectievelijk 3,6 m en 7,2 meter gehanteerd.

Tussenwanden

In de praktijk worden ruimtes in woningen regelmatig door middel van tussenwanden verdeeld. Daarom is het relevant om ook deze ontwerpmaatregel aan het model toe te voegen.

De ontwerpmaatregel 'tussenwanden' is enkel op het CLT-model toegepast. Twee configuraties zijn bekeken. Bij configuratie 1 is een tussenwand halverwege de diepte van de woning geplaatst en loopt over de linkerkant van het gebouw langs de buitenwand omhoog. Omdat deze tussenwand als stabiliteitswand werkt, zijn horizontale ondersteuning die dienstdoen als schoor uit het model verwijderd. Configuratie 2 betreft per verdieping twee tussenwanden die 2,6 m naar binnen zijn gezet. De wanden zijn diagonaal gepositioneerd en per verdieping wisselen de wanden van kant. In Figuur 3.17 zijn de plattegronden en vooraanzicht van het woongebouw weergegeven met de tussenwand configuraties. In het figuur geven de grijze stippellijnen de posities van de wand weer bij het wisselen van etage.



Figuur 3.17: Illustratie van de tussenwand configuratie bij een doorlopende tussenwand en een verspringende tussenwand

3.6.6. Dynamische analyses

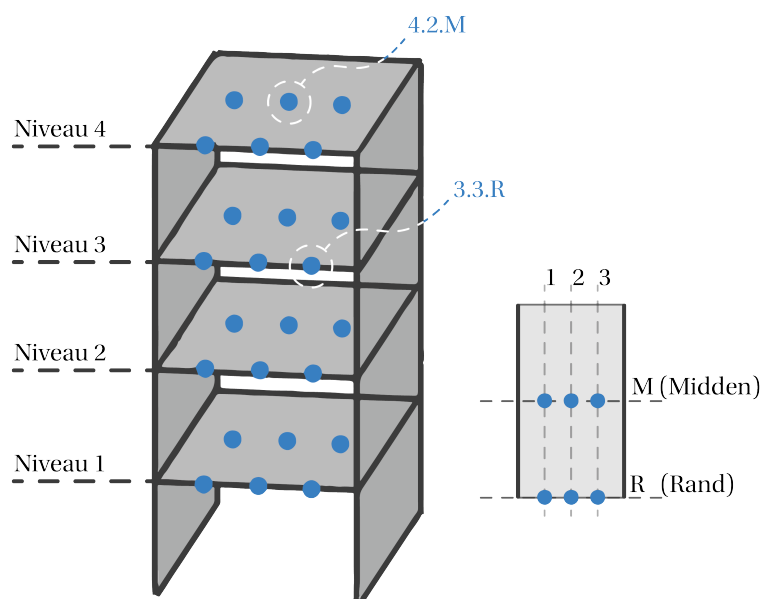
Voor het converteren van invoer naar uitvoer moeten analyses in het numerieke model worden uitgevoerd. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van twee typen analyses: de frequentierespons analyse en de lineaire tijdsafhankelijke analyse. Deze analyses zijn gebruikt voor het analyseren van de frequentierespons van het gebouw en de manier waarop het gebouw reageert op een trein-geïnduceerde trilling. Waarbij deze trilling wordt geconverteerd naar een vloertrilling.

Frequentierespons analyse

Voor de betonnen en CLT-plaatmodellen zijn frequentierespons analyses uitgevoerd. Met behulp van de frequentierespons analyse is geanalyseerd welke frequenties bijzonder relevant zijn voor het ontwerp van woongebouwen naast het spoor. Deze analyse berekent op lineaire basis de respons van de modellen die blootgesteld zijn aan een serie van harmonische excitaties. De excitatie bedraagt een trilling met een constante amplitude van 1 mm/s. Hierbij is gebruik gemaakt van een constante frequentie-afhankelijke factor van 1,0 voor het domein

tussen 0 Hz en 100 Hz. Het resultaat is een trilling met een constante amplitude over het beschreven frequentiedomein. Voor de frequentierespons analyses is modale demping toegepast, conform Tabel 3.8. Met de toepassing van demping zijn singulariteiten gedurende de numerieke analyse vermeden.

Op iedere locatie van de vloer verschilt het resultaat van de frequentierespons. Om de frequentierespons te kunnen gebruiken voor het voorspellen van de ontwerpmaatregelen die de trillingshinder reduceren, is gekeken naar de omhullende van de frequentierespons. Hiermee wordt een bovengrensbenadering gehanteerd. Per verdiepingvloer zijn zes meetpunten gehanteerd, waarvan drie op de rand en drie in het midden van de plaat. De locaties van deze drie punten zijn op een kwart, een half en driekwart van de plaatbreedte weergegeven. Ter illustratie zijn de 24 locaties weergegeven met blauwe knopen in Figuur 3.18. De locatie van de knoop met benaming '3.3.M' is op de derde verdieping, op driekwart van de breedte en op de rand van de plaat.



Figuur 3.18: Illustratie van de gekozen knopen voor het bepalen van de omhullende frequentie respons

Lineaire tijdsafhankelijke analyse

De lineaire tijdsafhankelijke analyse is gebruikt voor het analyseren van een trein-geïnduceerde trilling. Deze lineaire tijdsafhankelijke analyse is in het programma uitgevoerd middels een niet lineaire tijdsafhankelijke analyse. Een trein-geïnduceerde trilling heeft een dusdanig lage amplitude dat het model in de lineaire fase dient te blijven. Dit is tijdens het uitvoeren van de analyses gecontroleerd en is juist. Geometrische en fysische niet-lineariteit is in het model uitgezet. Dynamische instellingen zijn meegenomen door een consistente dempingsmatrix en Rayleigh-damping toe te passen.

Om de dynamische evenwichtsvergelijking op te lossen in de volgende tijdstep is gebruik gemaakt van het Newmark integratie schema. Hiervoor zijn de constante $\alpha = 0,5$ en $\beta = 0,25$ gebruikt. Als gevolg is de integratie methode onvoorwaardelijk numeriek stabiel en wordt geen numerieke demping aan het model toegevoegd.

Door de lineaire stijfheidsmatrix als gradiënt-matrix te kiezen voor de iteratieve oplossingsprocedure, is gecontroleerd dat de analyse in het lineaire regime blijft. Dit houdt in wanneer evenwicht is gevonden in de 0^e iteratie, dan bevindt het model zich in de lineaire fase.

4

Methode – Omhullende frequentierespons

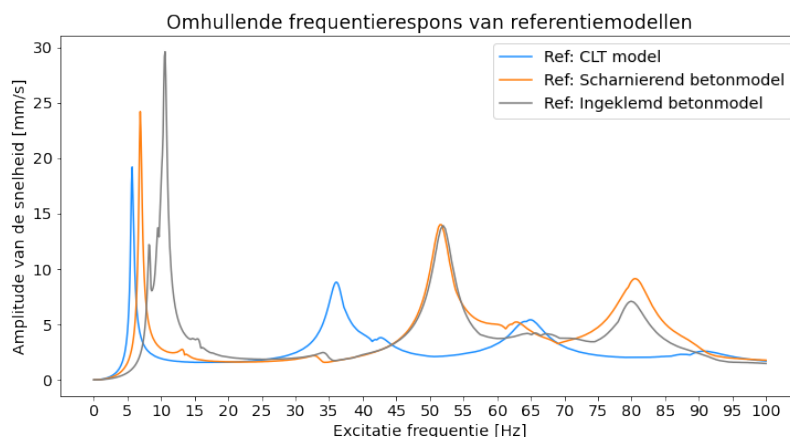
Hoofdstuk 4 presenteert de dataset bestaande uit de omhullende frequentierespons analyses van de CLT- en betonmodellen met en zonder ontwerpmaatregelen. De dataset alleen geeft de relevante frequenties van de modellen met ontwerpmaatregelen weer. Daarbij kan de dataset in combinatie met het spectrum van de trein-geïnduceerde trilling gebruikt worden voor het voorspellen van trillingshinder. Deze resultaten tonen de amplitude van de vloeren bij de invoer van een trilling met constante amplitude. De omhullende frequentierespons is afgezet tegen de excitatiefrequentie. Hierbij is het effect van verschillende ontwerpmaatregelen bestudeerd en dit is vervolgens vergeleken met de manier waarop het CLT-model zich verhoudt tot de betonnen modellen. Het hoofdstuk is zodanig opgebouwd dat de omhullende frequentierespons per maatregel voor CLT, scharnierende betonnen en ingeklemde betonnen modellen zijn getoond.

4.1. Referentiemodellen CLT en beton

De relevante frequenties van het CLT-referentiemodel, betonnen referentiemodel met scharnierende vloeren en het betonnen referentiemodel met ingeklemde vloeren, geven de eerste pieken op respectievelijk 5,7 Hz, 6,9 Hz en 10,6 Hz (zie Figuur 4.1). Deze pieken representeren resonantie van de vloeren en zijn in de thesis met resonantiepieken benoemd.

Bij de referentiemodellen is de omhullende frequentierespons getoond tot 100 Hz, in dit domein zijn drie resonantiepieken weergegeven. Door de relatief lage amplitude in combinatie met een hogere orde trilvorm behorende bij de derde piek, wordt bij de referentiemodellen en de ontwerpmaatregelen enkel gekeken naar de eerste twee resonantiepieken. Dit houdt in dat de omhullende frequentierespons van de meeste ontwerpmaatregelen is beschouwd tot 60 Hz, daar waar de tweede piek niet zichtbaar is, is de respons tot 70 Hz beschouwd.

In het figuur is de amplitude weergegeven van de eerste resonantiepiek die toe neemt naarmate de excitatiefrequentie toe neemt. De tweede resonantiepiek is voor zowel het scharnierende als het ingeklemde betonmodel gelijk. Uit Tabel 4.1 blijkt dat de tweede resonantiepiek voor het CLT-model 15,4 Hz eerder aanwezig is vergeleken met de betonmodellen. De tabel geeft ook de relevante waarden weer bij de eerste twee resonantiepieken. Ook is het verschil in procenten (Δ) ten opzichte van het CLT-referentiemodel weergegeven.



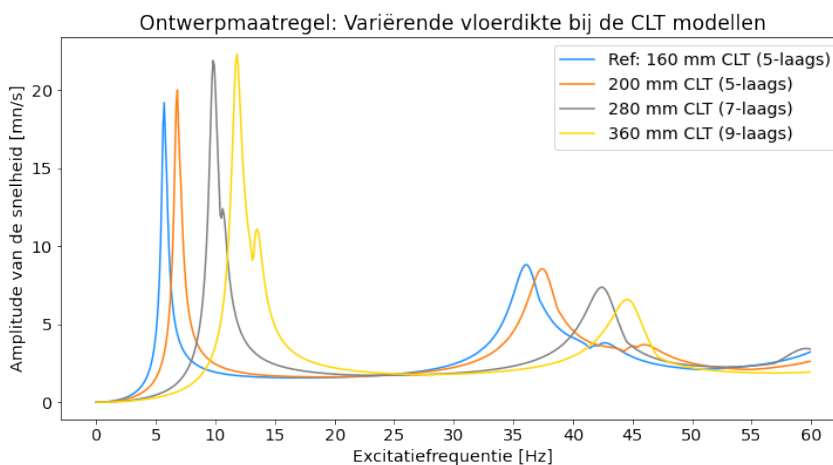
Figuur 4.1: Omhullende frequentierespons van CLT en betonnen referentiemodellen

Tabel 4.1: Resultaten eerste en tweede resonantiepieken van de referentiemodellen

Referentie modellen	1 ^e piek		1 ^e piek		2 ^e piek		2 ^e piek	
	f [Hz]	Δ [%]	\hat{v} [mm/s]	Δ [%]	f [Hz]	Δ [%]	\hat{v} [mm/s]	Δ [%]
CLT	5,7	-	19,2	-	36,1	-	8,8	-
Beton scharnierend	6,9	21	24,2	26	51,5	43	13,9	58
Beton ingeklemd	10,6	86	29,6	52	51,1	42	14,0	59

4.2. Ontwerpmaatregel: Vloerdikte

Bij het CLT-model zijn de vloerdiktes dusdanig vergroot dat deze overeenkomen met een 5-laagse, 7-laagse en 9-laagse plaatconfiguratie, waarvan iedere tussenlaag 40 mm dik is. Uit Tabel 4.2 blijkt dat de dikte met 25%, 75% en 125% is toegenomen vergeleken het referentiemodel. Hierdoor verschuift de eerste resonantiepiek van 5,7 Hz naar 6,8 Hz, 9,8 Hz en 11,8 Hz. Ook neemt de intensiteit van de amplitude toe. Figuur 4.2 toont aan dat de amplitude van de tweede resonantiepieken afneemt bij een toenemende plaatdikte. De tweede resonantiepieken van de maatregelen verschuiven van 36 Hz naar 37 Hz, 42 Hz en 45 Hz en hebben een corresponderende amplitude van 8,6 mm/s, 7,4 mm/s en 6,6 mm/s.

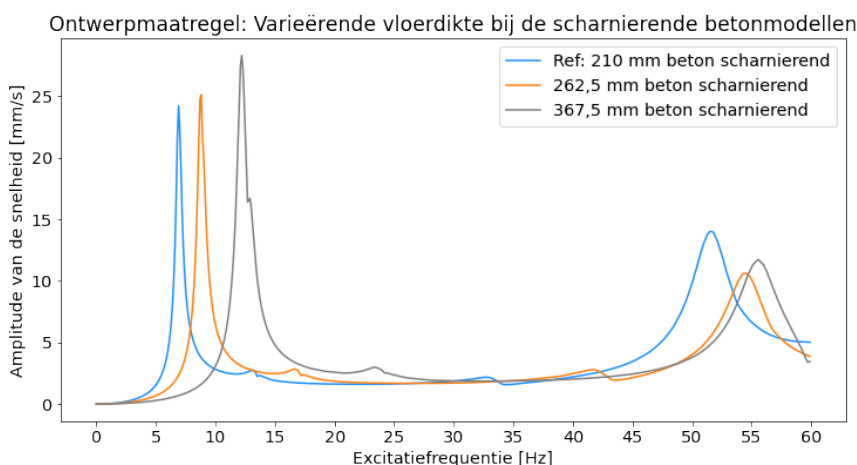


Figuur 4.2: Omhullende frequentierespons van CLT bij variërende vloerdiktes

Tabel 4.2: Resultaten eerste en tweede resonantiepieken van CLT-model bij variërende vloerdikte

Vloerdikte CLT	1 ^e piek		1 ^e piek		2 ^e piek		2 ^e piek	
	f [Hz]	Δ [%]	\hat{v} [mm/s]	Δ [%]	f [Hz]	Δ [%]	\hat{v} [mm/s]	Δ [%]
Ref: 160 mm (5-laags)	5,7	-	19,2	-	36,1	-	8,8	-
CLT 200 mm (5-laags)	6,8	19	20,0	4	37,4	4	8,6	3
CLT 280 mm (7-laags)	9,8	72	21,9	14	42,4	17	7,4	20
CLT 360 mm (9-laags)	11,8	101	22,3	16	44,5	23	6,6	34

De vloerdiktes voor het scharnierende betonmodel zijn toegenomen met 25% en 75% naar een respectievelijke dikte van 262,5 mm en 367,5 mm. Figuur 4.3 toont evenals in Figuur 4.2 een stijging van de eerste resonantiepiek bij een toenemende vloerdikte en bij de tweede resonantiepiek een afnemende de amplitude. Echter, toont de resonantiepiek bij een vloerdikte van 262,5 mm een onverwachte waarde van de amplitude. Tabel 4.3 geeft de bijbehorende frequenties en amplitudes van de eerste en tweede resonantiepieken weer, bij het gebruiken van verschillende plaatdiktes voor het scharnierende betonnen model.

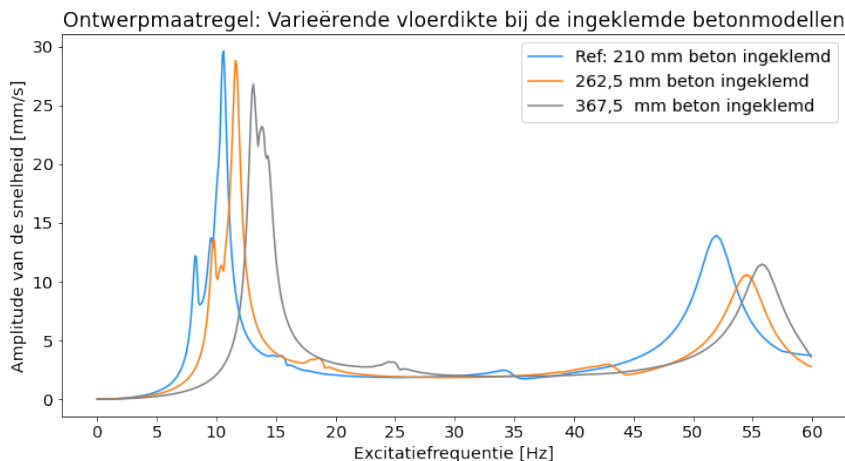


Figuur 4.3: Omhullende frequentierespons van het scharnierende betonmodel bij variërende vloerdiktes

Tabel 4.3: Resultaten eerste en tweede resonantiepieken van scharnierende betonmodel bij variërende vloerdikte

Vloerdikte Beton scharnierend	1 ^e piek		1 ^e piek		2 ^e piek		2 ^e piek	
	f [Hz]	Δ [%]	\hat{v} [mm/s]	Δ [%]	f [Hz]	Δ [%]	\hat{v} [mm/s]	Δ [%]
Ref: beton 210 mm	6,9	-	24,2	-	51,5	-	13,9	-
Beton 262,5 mm	8,8	23	25,1	4	54,3	5	10,6	-31
Beton 376,5 mm	12,2	77	28,3	17	55,5	8	11,5	-17

De vloerdiktes voor het ingeklemde betonmodel zijn toegenomen met 25% en 75% naar een respectievelijke dikte van 262,5 mm en 367,5 mm. Bij het verdikken van deze vloeren treden de eerste resonantiepieken op bij 11,6 Hz en 13,1 Hz. De amplitudes in Figuur 4.4 laten zien dat bij deze modellen het verdikken van de betonvloer resulteert in een lagere amplitude. Ditzelfde geldt ook voor de tweede resonantiepieken, maar ook bij de ingeklemde betonvloer toont de tweede resonantiepiek bij een vloerdikte van 262,5 mm een afwijkende waarde van de amplitude. De waardes voor de eerste en tweede resonantiepiek behorend bij het starre betonmodel zijn weergegeven in Tabel 4.4.



Figuur 4.4: Omhullende frequentierespons van het ingeklemde betonmodel bij variërende vloerdiktes

Tabel 4.4: Resultaten eerste en tweede resonantiepieken van ingeklemde betonmodel bij variërende vloerdikte

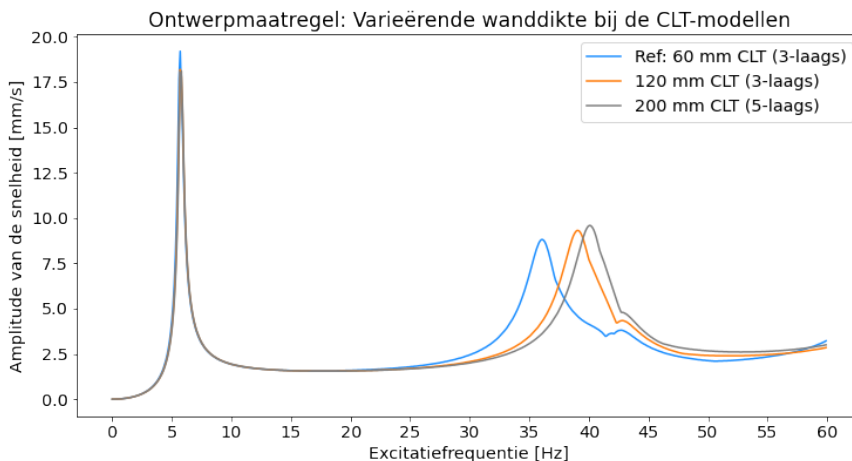
Vloerdikte	1 ^e piek		1 ^e piek		2 ^e piek		2 ^e piek	
Beton ingeklemd	f [Hz]	Δ [%]	\hat{v} [mm/s]	Δ [%]	f [Hz]	Δ [%]	\hat{v} [mm/s]	Δ [%]
Ref: beton 210 mm	10,6	-	29,6	-	51,1	-	14,0	-
Beton 262,5 mm	11,6	9	28,8	-3	54,5	5	10,6	-24
Beton 376,5 mm	13,1	13	26,8	-9	55,8	8	11,7	-16

4.2.1. Vergelijken CLT en betonnen modellen

Het variëren van vloerdikte resulteert in een variatie van de eerste resonantiepiek tussen de 5,7 Hz en 11,8 Hz. Voor de tweede resonantiepiek is een variatie aanwezig door variëren van vloerdikte tussen de 36,1 Hz en 44,5 Hz. Het versterken van de scharnierende betonvloeren resulteert in relatief dezelfde verschuiving van de eerste resonantiepiek, vergeleken met de CLT-vloeren. Daarentegen is de verschuiving van de eerste piek bij het versterken van de ingeklemde betonvloeren lager dan de modellen met scharnierende vloeren. Voor de scharnierende modellen geldt dat bij het verschuiven van de eerste resonantiepiek de waarde van de amplitude stijgt, terwijl de amplitude van de ingeklemde vloeren daalt.

4.3. Ontwerpmaatregel: Wanddikte

De wanddiktes voor het CLT-model zijn toegenomen met 50% en 33,3% naar een respectievelijke dikte van 120 mm en 200 mm. Het blijkt uit Figuur 4.5 en Tabel 4.5 dat het verdikken van de wanden geen significant effect heeft op de eerste resonantiepieken. Het effect van deze ontwerpmaatregel is pas waarneembaar bij de tweede en derde pieken. Het effect van de ontwerpmaatregel op de excitatiefrequentie neemt toe bij hogere resonantiepieken. Het versterken van de wanden resulteert in hogere amplitudes van de resonantiepieken.

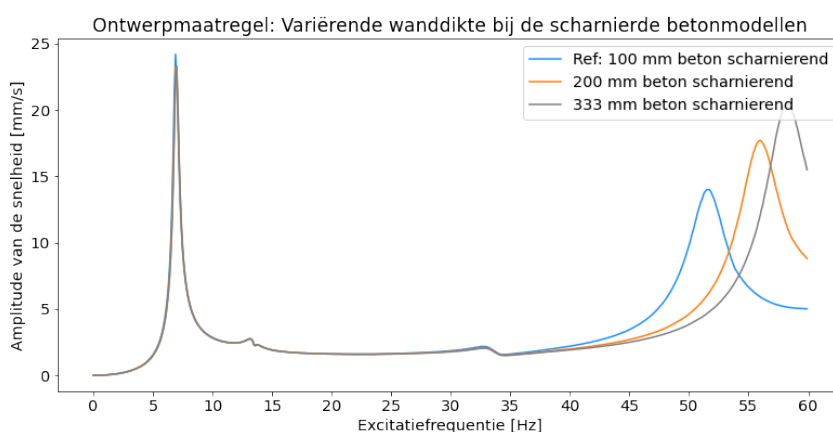


Figuur 4.5: Omhullende frequentierespons van CLT-model bij verschillende wanddiktes

Tabel 4.5: Resultaten eerste en tweede resonantiepieken van CLT-model bij variërende wanddikte

Wanddikte	1 ^e piek		1 ^e piek		2 ^e piek		2 ^e piek	
	<i>f</i> [Hz]	Δ [%]	\hat{v} [mm/s]	Δ [%]	<i>f</i> [Hz]	Δ [%]	\hat{v} [mm/s]	Δ [%]
Ref: CLT 60 mm (3-laags)	5,7	-	19,2	-	36,1	-	8,8	-
CLT 120 mm (3-laags)	5,7	0	18,2	-5	39,0	8	9,3	6
CLT 200 mm (5-laags)	5,8	2	18,1	-6	40,1	11	9,6	9

De wanddiktes voor het scharnierende betonmodel zijn toegenomen met 50% en 33,3% naar een respectievelijke dikte van 200 mm en 333 mm. Het scharnierende model in Figuur 4.6 toont bij de eerste resonantiepieken ook geen waarneembaar effect van de ontwerpmaatregel. Tabel 4.6 toont aan dat de frequenties van de tweede pieken verschuiven met 9% en 13%.

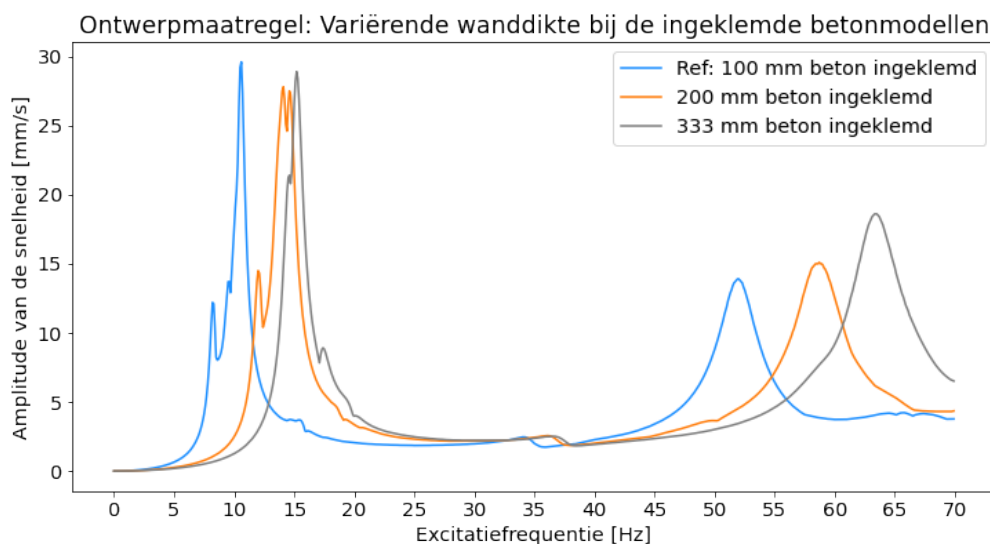


Figuur 4.6: Omhullende frequentierespons van scharnierend betonnen model bij verschillende wanddiktes

Tabel 4.6: Resultaten eerste en tweede resonantiepieken van scharnierende betonmodel bij variërende wanddikte

Wanddikte	1 ^e piek		1 ^e piek		2 ^e piek		2 ^e piek	
	f [Hz]	Δ [%]	\hat{v} [mm/s]	Δ [%]	f [Hz]	Δ [%]	\hat{v} [mm/s]	Δ [%]
Ref: beton 100 mm	6,9	-	24,2	-	51,5	-	14,0	-
Beton 200 mm	6,9	0	23,2	-4	55,9	9	17,7	26
Beton 333 mm	7,0	1	23,3	-4	58,2	13	20,5	46

De wanddiktes voor het ingeklemde betonmodel zijn toegenomen met 50% en 33,3% naar een respectievelijke dikte van 200 mm en 333 mm. Deze ontwerpmaatregel resulteert bij de modellen met ingeklemde betonvloeren in een verschuiving van de excitatiefrequentie van 33% en 43% vergeleken met het referentiemodel naar een excitatiefrequentie van 14,1 Hz en 15,2 Hz. Hierbij neemt de amplitude slechts 2% af. Tabel 4.3 toont aan dat de excitatie frequentie bij de tweede resonantiepieken relatief meer verschuift vergeleken met de eerste pieken. De corresponderende amplitudes van de tweede resonantiepieken nemen juist toe bij een hogere excitatiefrequentie.



Figuur 4.7: Omhullende frequentierespons van star betonnen model bij verschillende wanddiktes

Tabel 4.7: Resultaten eerste en tweede resonantiepieken van ingeklemde betonmodel bij variërende wanddikte

Wanddikte	1 ^e piek		1 ^e piek		2 ^e piek		2 ^e piek	
	f [Hz]	Δ [%]	\hat{v} [mm/s]	Δ [%]	f [Hz]	Δ [%]	\hat{v} [mm/s]	Δ [%]
Ref: beton 100 mm	10,6	-	29,6	-	51,9	-	13,9	-
Beton 200 mm	14,1	33	27,8	-6	58,7	13	15,1	9
Beton 333 mm	15,2	43	28,9	-2	63,3	22	18,6	45

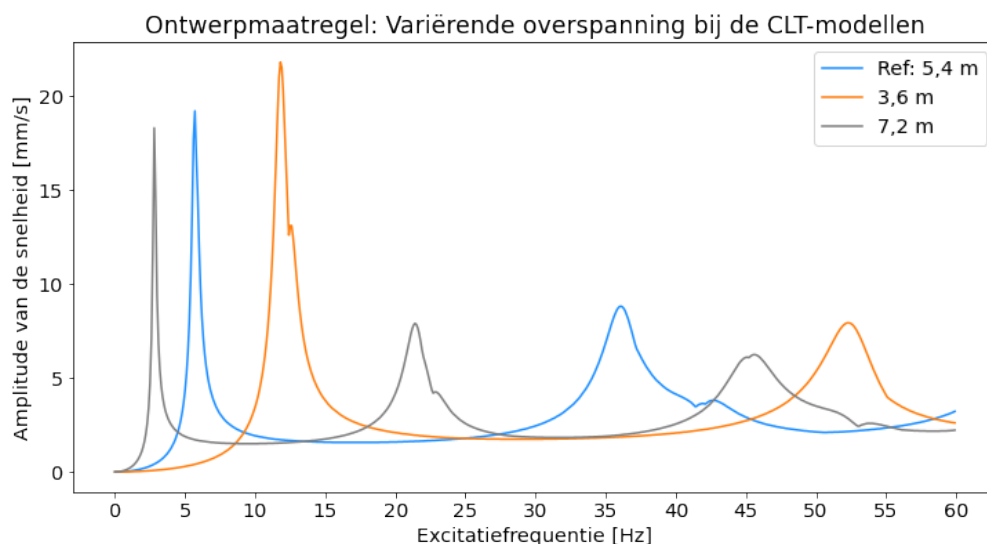
4.3.1. Vergelijken CLT en betonnen modellen

Voor de scharnierende modellen toont de ontwerpmaatregel geen significant waarneembare effecten voor de eerste resonantiepieken. Ten opzichte van het scharnierende betonmodel vertoont het CLT-model bij een versterking van de wanden voor de tweede resonantiepieken

relatief dezelfde verschuiving van de excitatiefrequentie. Ten opzichte van het ingeklemde betonmodel is het effect van de ontwerpmaatregel op het CLT-model aangezien minder. Bij de tweede resonantiepiek is het effect van het CLT-ontwerp een factor 1,7 lager. Zowel voor de eerste als de tweede resonantiepiek toont het CLT-model een relatief kleinere verschuiving van de excitatiefrequentie.

4.4. Ontwerpmaatregel: Overspanning

De invloed van de overspanning op de omhullende frequentierespons is onderzocht voor lengtes van 3,6 m, 5,4 m en 7,2 m. In Figuur 4.8 is de omhullende frequentierespons van de CLT-modellen met variërende overspanning weergegeven. Het blijkt uit Tabel 4.8 dat voor een overspanning van 3,6 m en 7,2 m de eerste resonantiepiek verschuift van 5,7 Hz naar respectievelijk 11,8 Hz en 2,8 Hz. Dit resulteert in een relatieve stijging en daling van 107% en -51%. Ook resulteert het toepassen van deze ontwerpmaatregel in een forse verschuiving van de tweede resonantiepiek van 45% en -41%. De amplitudes van de eerste resonantiepiek verschillen 14% en -5% van het referentiemodel.

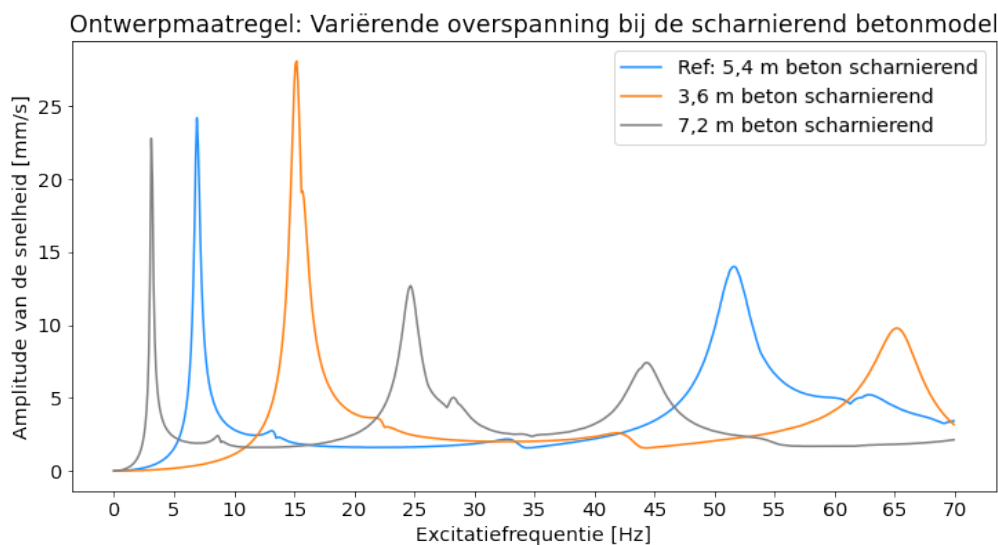


Figuur 4.8: Omhullende frequentierespons van CLT bij verschillende lengtes van overspanning

Tabel 4.8: Resultaten eerste en tweede resonantiepieken van CLT-model bij variërende overspanning

Overspanning CLT	1 ^e piek		1 ^e piek		2 ^e piek		2 ^e piek	
	f [Hz]	Δ [%]	\hat{v} [mm/s]	Δ [%]	f [Hz]	Δ [%]	\hat{v} [mm/s]	Δ [%]
Ref: CLT 5,4 m	5,7	-	19,2	-	36,1	-	8,8	-
CLT 3,6 m	11,8	107	21,8	14	52,3	45	7,9	9
CLT 7,2 m	2,8	-51	18,3	-5	21,4	-41	7,9	9

Dezelfde lengtes voor de overspanning zijn aangehouden voor het scharnierende betonnen model. Het toepassen van de maatregel resulteert in een verschuiving van de eerste resonantiepiek van 120% en -55% (zie Tabel 4.9). Vergeleken met het referentiemodel blijkt uit Figuur 4.9 dat zowel voor het vergoten de overspanning leidt tot een verschuiving naar een lagere excitatiefrequentie voor de eerste twee resonantiepieken. Bij het verkleinen van de overspanning gebeurt het omgekeerde.



Figuur 4.9: Omhullende frequentierespons van scharnierend betonmodel bij verschillende lengtes van overspanning

Tabel 4.9: Resultaten eerste en tweede resonantiepieken van scharnierende betonmodel bij variërende overspanning

Overspanning Beton scharnierend	1 ^e piek		1 ^e piek		2 ^e piek		2 ^e piek	
	f [Hz]	Δ [%]	\hat{v} [mm/s]	Δ [%]	f [Hz]	Δ [%]	\hat{v} [mm/s]	Δ [%]
Ref: beton 5,4 m	6,9	-	24,2	-	51,5	-	14,0	-
Beton 3,6 m	15,2	120	28,1	16	65,2	26,6	9,8	-30
Beton 7,2 m	3,1	-55	22,8	-6	24,7	-52	12,7	-9

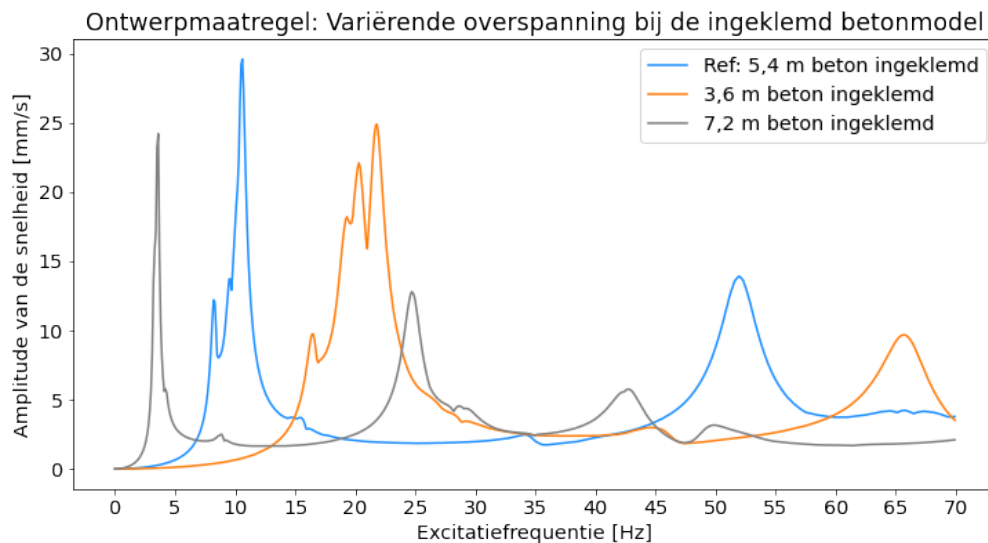
Ook voor het ingeklemde betonmodel zijn dezelfde afmetingen aangehouden als het CLT-model. Het variëren van de ontwerpmaatregel zorgt bij de eerste resonantiepiek voor een verschuiving van 106% en -78% bij het vergroten en verkleinen van de overspanning, blijkt uit Tabel 4.10. Het variëren van de overspanning resulteert in een daling van de amplitude en excitatiefrequentie voor de eerste en tweede resonantiepiek. De omhullende frequentierespons voor deze ontwerpmaatregel is weergegeven in Figuur 4.10.

Tabel 4.10: Resultaten eerste en tweede resonantiepieken van ingeklemde betonmodel bij variërende overspanning

Overspanning Beton ingeklemd	1 ^e piek		1 ^e piek		2 ^e piek		2 ^e piek	
	f [Hz]	Δ [%]	\hat{v} [mm/s]	Δ [%]	f [Hz]	Δ [%]	\hat{v} [mm/s]	Δ [%]
Ref: beton 5,4 m	10,6	-	29,6	-	51,9	-	13,9	-
Beton 3,6 m	21,8	106	24,9	-16	65,6	26	9,7	-30
Beton 7,2 m	3,6	-78	24,2	-18	24,7	-52	12,8	-8

4.4.1. Vergelijken CLT en betonnen modellen

Het CLT gedraagt zich relatief hetzelfde ten opzichte van het scharnierende betonnen model voor de eerste resonantiepiek. Bij de tweede resonantiepiek van het CLT-model leidt tot een relatief hogere excitatiefrequentie vergeleken met het scharnierende betonmodel (res-



Figuur 4.10: Omhullende frequentierespons van ingeklemd betonmodel bij verschillende lengtes van overspanning

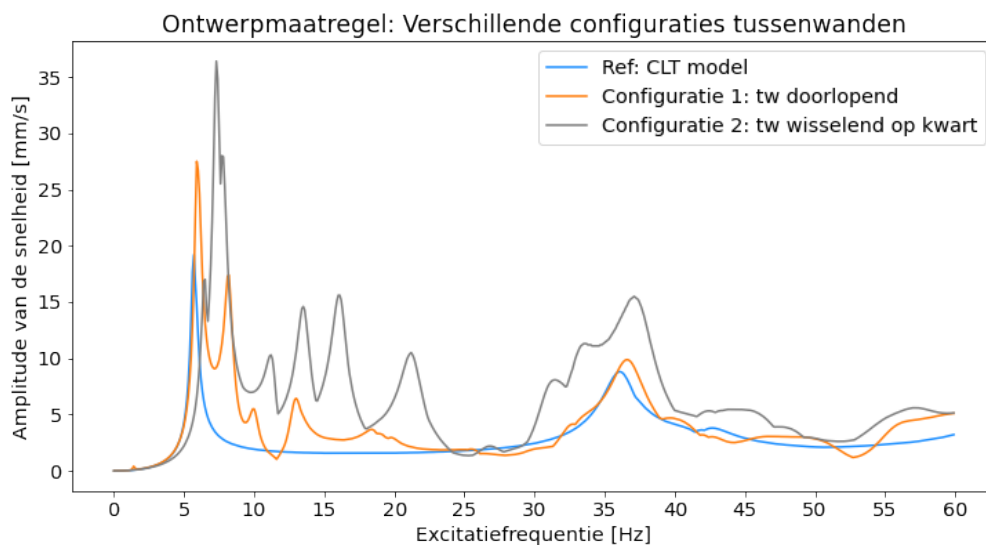
pectievelijk 45% en 26,6%). Het vergroten van de overspanning leidt vergeleken met het CLT-model bij het ingeklemd beton model tot een relatief lagere excitatie frequentie. Daarentegen leidt een kleinere overspanning bij de tweede resonantiepiek van het ingeklemd betonmodel juist tot een relatief lagere excitatiefrequentie. De tweede resonantiepieken van de betonmodellen geven gelijke waarden.

4.5. Ontwerpmaatregel: tussenwanden

De omhullende frequentierespons bij de ontwerpmaatregel 'tussenwanden', resulteert in een verstoring vergeleken met het referentiemodel. Figuur 4.11 toont meerdere respons pieken tussen de 6 Hz en 36 Hz. De grootste pieken vallen samen met het referentiemodel. Dit valt op te maken uit de frequenties die zijn weergegeven in Tabel 4.11. Het toepassen van tussenwanden resulteert in een significant hogere amplitude van de eerste piek, die 43% en 90% hoger is dan in het referentiemodel.

Tabel 4.11: Resultaten resonantiepieken bij toepassen van tussenwanden

Tussenwanden	1 ^e piek		1 ^e piek		2 ^e piek		2 ^e piek	
	f [Hz]	Δ [%]	\hat{v} [mm/s]	Δ [%]	f [Hz]	Δ [%]	\hat{v} [mm/s]	Δ [%]
Ref: CLT	5,7	-	19,2	-	36,1	-	8,8	-
Configuratie 1	5,9	2	27,5	43	36,6	1	9,9	13
Configuratie 2	7,3	24	36,4	90	37,1	1	15,5	76



Figuur 4.11: Omhullende frequentierespons van CLT bij verschillende configuraties van tussenwanden

4.6. Conclusie

Dit hoofdstuk toont de omhullende frequentierespons analyses, waarmee de relevante frequenties van de modellen zijn aangetoond. De omhullende frequentierespons van de referentiemodellen en de modellen met de ontwerpmaatregelen: vloerdikte, wanddikte, overspanning en tussenwanden zijn vergeleken. Per ontwerpmaatregel is het effect getoond op de omhullende frequentierespons waarbij is ingegaan op de eerste twee resonantiepieken. Deze dataset dient gebruikt te worden bij het voorspellen van trillingshinder. Met de dataset alleen is trillingshinder nauwelijks te beoordelen. Hierbij is een spectrum van een trein-geïnduceerde trilling essentieel.

5

Casus - Beschrijving en prognose van trillingshinder

Hoofdstuk 5 beschrijft de locatie van de casus en toont de meetresultaten. Ook wordt de herkomst van de frequentie-inhoud van de meetresultaten onderzocht. Daarna wordt, in combinatie met de omhullende frequentierespons vanuit de methode en het gemeten spectrum, een prognose voor trillingshinder gegeven.

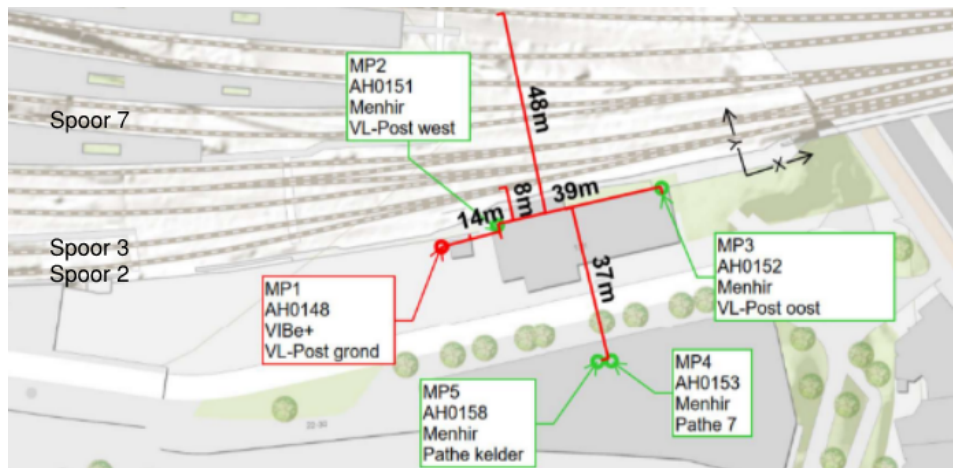
5.1. Casus selectie

De casus vindt plaats naast het spoor ten zuidoosten van het centraal station van Arnhem. Deze locatie is gekozen vanwege de realisatie van onder andere woningen. Dit maakt deze locatie representatief voor dit onderzoek.

Het spoortracé bestaat uit tien sporen (spoor 2 tot en met spoor 11). Diverse type treinen passeren dagelijks dit station: goederentreinen, intercity's en sprinters. Goederentreinen rijden voorbij Arnhem met een rijsnelheid van 60 km/u en passagierstreinen rijden ongeveer met een snelheid van 40 km/u station Arnhem in en uit. De goederentreinen rijden voornamelijk op sporen 2 en 7. Verder zijn diverse wissels in het tracé aanwezig. De breedte van het spoortracé bedraagt circa 40 m.

Een externe partij heeft trillingsmetingen uitgevoerd op vijf locaties. Deze variëren van 8 m tot en met 45 m vanaf het dichtstbijzijnde spoor 2. Meetpunt 1 (MP1) bevindt zich in de grond, maar betreft metingen van 2 seconden en is daarom niet representatief voor een treinpassage. Meetpunten MP2 tot en met MP5 zijn gesitueerd op de constructie van bestaande gebouwen. Om een sterke correlatie te krijgen met de excitatie die aan de fundering is aangeboden, zijn de meetpunten naast een kolom geplaatst. Op Figuur 5.1 zijn de verschillende meetlocaties aangegeven. De spectra van meetpunten MP2 en MP5 zijn door de externe partij vrijgegeven voor verschillende type treinen, rijdend op verschillende sporen. Figuur 5.2a en Figuur 5.2b geven de locaties in het gebouw weer van de metingen MP2 en MP5.

De vrijgegeven spectra van meetpunten MP2 en MP5, weergegeven in Figuren 5.3 en 5.4, tonen het kwadratische gemiddelde (in het Engels ook root mean square of rms genoemd) van de trillingssterkte in mm/s in het frequentiedomein. Voor de verticale as is een logaritmische schaal gekozen. De frequenties op de horizontale as zijn opgedeeld in één derde octaafbanden.



Figuur 5.1: Locaties trillingsmetingen Arnhem



(a) Locatie MP2 nabij kolom in de verkeersleidingspost.

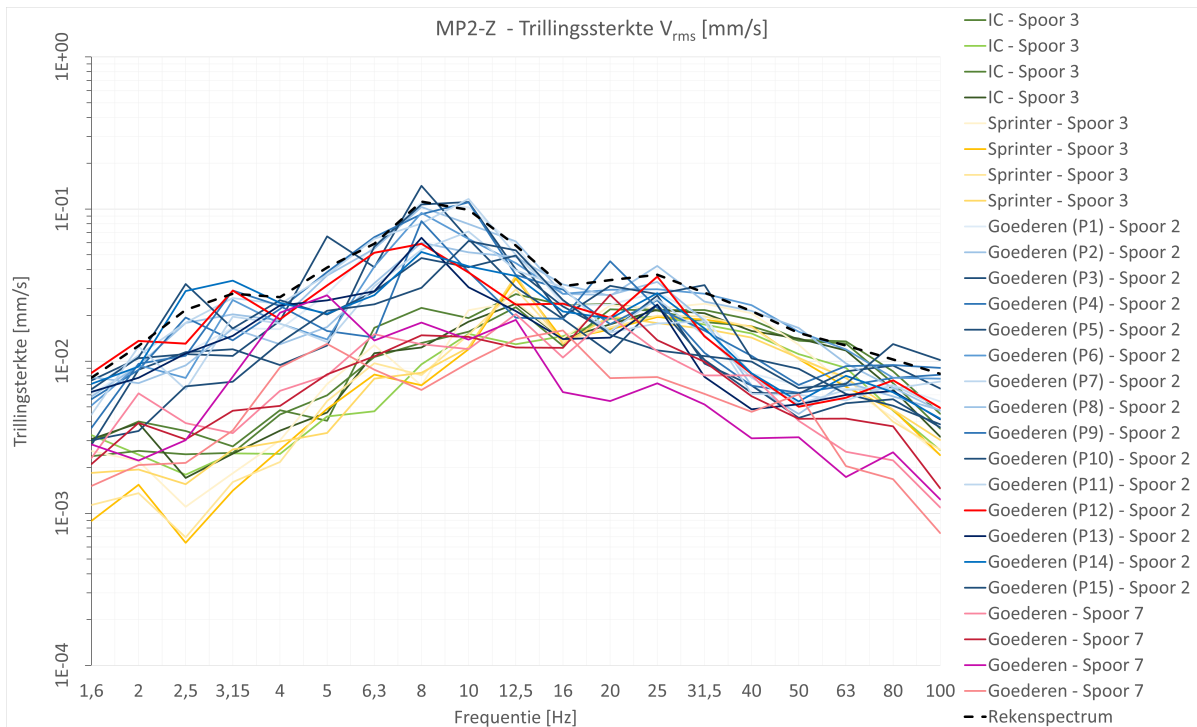


(b) Locatie MP5 nabij kolom in de verkeersleidingspost.

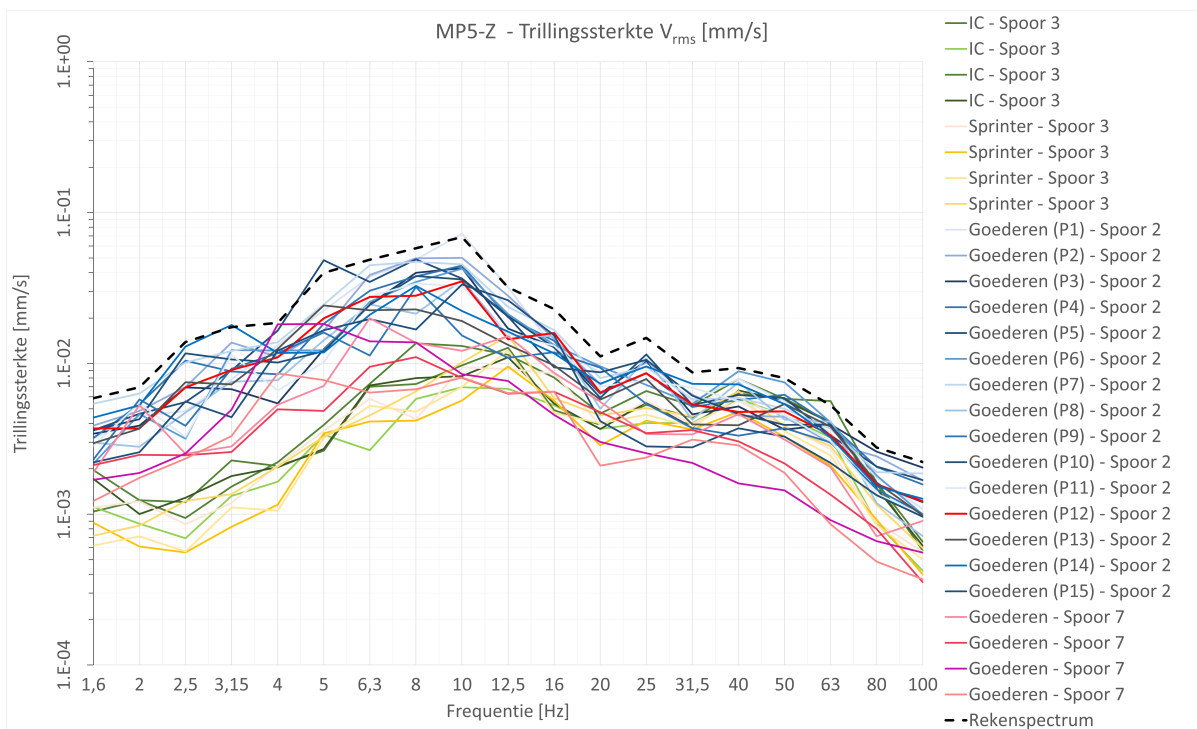
Figuur 5.2: Exacte locatie van de meetpunten MP2 en MP5

5.2. Analyseren datacollectie

De spectra van meetpunten MP2 en MP5 zijn met elkaar vergeleken. MP2 heeft een afstand van 8 m tot spoor 2. De afstand van MP5 bedraagt 45 m. Beide spectra vertonen gelijkenissen betreft de frequentie-inhoud. Het verschil in trillingsterkte tussen spectra MP2 en MP5 varieert een factor 1,4 tot 4,5. Voor beide spectra resulteren de goederentreinen op spoor 2 in de hoogste trillingssterkte, deze piek heeft een corresponderende frequentie tussen de 6,3 Hz en 12,5 Hz. Voor intercity's en sprinters is de trillingssterkte het hoogst tussen de 12,5 Hz en 31,5 Hz.



Figuur 5.3: Trillingsmeting MP2 in verticale richting op fundering VL-Post in Arnhem



Figuur 5.4: Trillingsmeting MP5 in verticale richting op fundering Pathé in Arnhem

Opvallend is dat beide spectra pieken tonen die afkomstig zijn van goederentreinen in de lage frequenties. Dit is in lijn met de karakteristieken van goederentreinen volgens [27], Thompson schrijft dat de relevante frequentie-inhoud vaak onder de 10 Hz ligt. Dit is bij het gemeten spectrum ook het geval. Voor verdere analyse van het spectrum zijn verschillende eigen-

schappen van het spoor en de treinen geanalyseerd. Deze relevante eigenschappen van de type treinen zijn weergegeven in Tabel 5.1. Vanwege het grote verschil in type goederentreinen, zijn aannames gedaan voor de wiel-diameter en afstanden van de draaistellen op basis van veel voorkomende afmetingen bij goederenwagons van het bedrijf DB Schenker [38]. Vanuit de literatuur [24] is bekend dat de frequentie voor de dynamische excitatie kan worden beschreven door $f = v/\lambda_y$. De rijsnelheid en golflengte zijn afhankelijk van het type trein en welke eigenschap van de trein of het spoor wordt beschouwd.

Tabel 5.1: Relevante trein-eigenschappen van een intercity, sprinter en goederentrein

	Intercity (DDZ)	Sprinter	Goederentrein
Wiel diameter [m]	0,92	0,85	0,85 (aanname)
H.o.h. draaistellen [m]	20,0	15,6	8-10 (aanname)
Afstand binnen draaistel [m]	2,5	2,8	1,8 (aanname)

Op basis van golflengten die afkomstig zijn van de wiel-omtrek, hart-op-hart afstand van de draaistellen en assen en de hart-op-hart afstand van de dwarsliggers zijn frequenties bepaald. De frequenties zijn weergegeven in Tabel 5.2. Een opmerkelijk resultaat is de frequentie behorende bij de afstand van de assen binnen een draaistel voor een goederentrein. De frequentie van 9,3 Hz komt overeen met de maatgevende piek van het gemeten spectrum in Arnhem. Voor de passagierstreinen lijkt de maatgevende frequentie vooral veroorzaakt te worden door de hart-op-hart afstand van de dwarsliggers. De frequentie behorende bij de hart-op-hart afstand van de dwarsliggers is voor de goederentreinen ook terug te vinden in het spectrum. In het spoortracé zijn ook wissels aanwezig. Vanwege de complexiteit van het effect van wissels zijn deze niet te herleiden naar een specifieke frequentie.

Tabel 5.2: Frequentie behorende bij trein-eigenschappen en spoorconfiguratie bij verschillende snelheden.

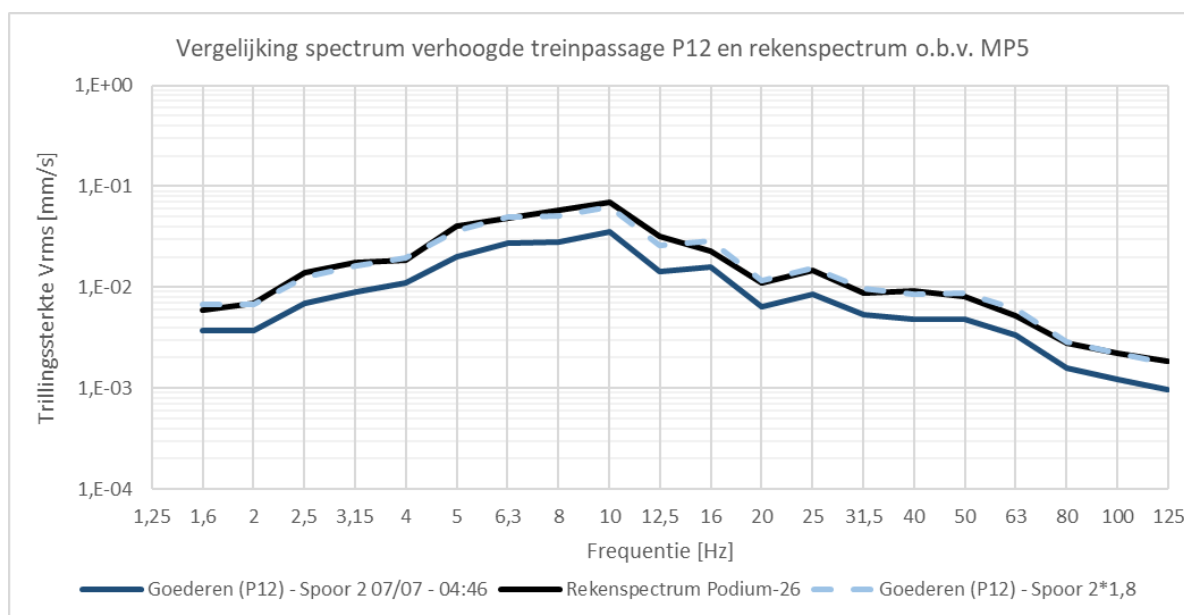
Treintype	Intercity (DDZ)	Sprinter (SLT)	Goederentrein
Rijsnelheid	40 km/u	40 km/u	60 km/u
Wiel diameter [Hz]	3,8	4,2	6,2
H.o.h. draaistellen [Hz]	0,5	0,7	2,1
Afstand binnen draaistel [Hz]	4,4	4,0	9,3
h.o.h. dwarsliggers (0,6 m) [Hz]	18,5	18,5	27,8

5.3. Keuze voor maatgevende excitatie

Zoals de methodiek in Hoofdstuk 3 voorschrijft, is voor de toetsing aan de SBR een trein-geïnduceerde trilling nodig die representatief is voor de desbetreffende locatie. Uit 40 passages, bestaande uit 10 spinters, 10 intercity's en 20 goederentreinen, is op probabilistische basis het rekenspectrum bepaald. De trillingssterkte van 95% van deze passages valt binnen het rekenspectrum. De rekenspectra zijn voor MP2 en MP5 met een zwartgestreepte lijn weergegeven in Figuren 5.3 en 5.4.

Vanuit de externe partij zijn de trillingsmetingen van de passages van goederentreinen P1 tot en met P15 vrijgegeven. Uit deze 15 passages is gezocht naar een passage met een gelijkwaardige trend als het rekenspectrum. Het blijkt de goederentrein P12 (in de spectra met de rode lijn aangegeven) voor meetpunt MP5 in goede overeenstemming is met de trend van het rekenspectrum van dit meetpunt. Zoals Figuur 5.5 toont, is de trillingssterkte van passage P12 lager dan het rekenspectrum. Daarom wordt dit spectrum met een factor 1,8 opgehoogd. Het verband tussen het spectrum van passage P12 en het tijdsignaal van deze treinpassage

is lineair aangenomen. Dit houdt in dat ten gevolgen van het ophogen van het spectrum, het tijdsignaal ook is opgehoogd met een factor 1,8. Omdat zowel een Fourier transformatie als het kwadratische gemiddelde een lineair verband hebben met het ophogen van het tijdsignaal, kan deze aanname gesteld worden. Tevens is deze aanname in Bijlage E gecontroleerd.



Figuur 5.5: Vergelijking rekenspectrum en verhoogde spectrum passage P12

5.3.1. Numerieke vertaling trein-geïnduceerde trilling

Het tijdsignaal van de verhoogde treinpassage P12 bestaat uit 88.747 datapunten. Omwille van de rekentijd van de numerieke analyses is gekozen om één vijfde van het daadwerkelijke signaal toe te passen in het numerieke rekenmodel. De spectrale vermogensdichtheid (PDS) van het originele signaal en het signaal met één vijfde van de datapunten zijn vergeleken om de geldigheid aan te tonen voor het gebruiken van het gereduceerde signaal. Het gereduceerde signaal blijkt af te wijken met een variantie van 5%.

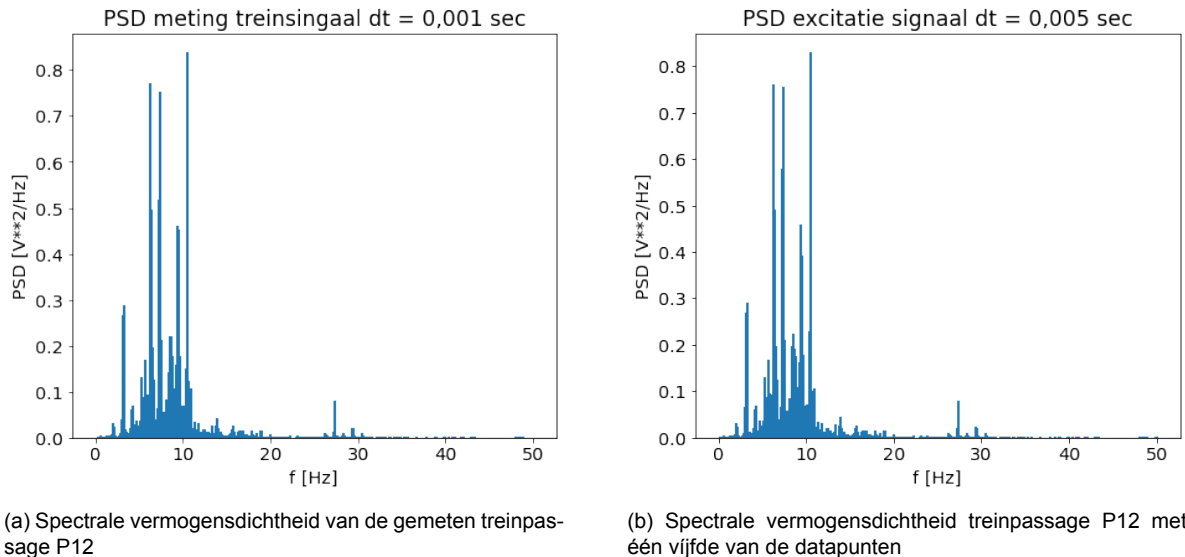
5.4. Kwalitatieve prognose trillingshinder

5.4.1. Prognose trillingshinder van referentiemodellen

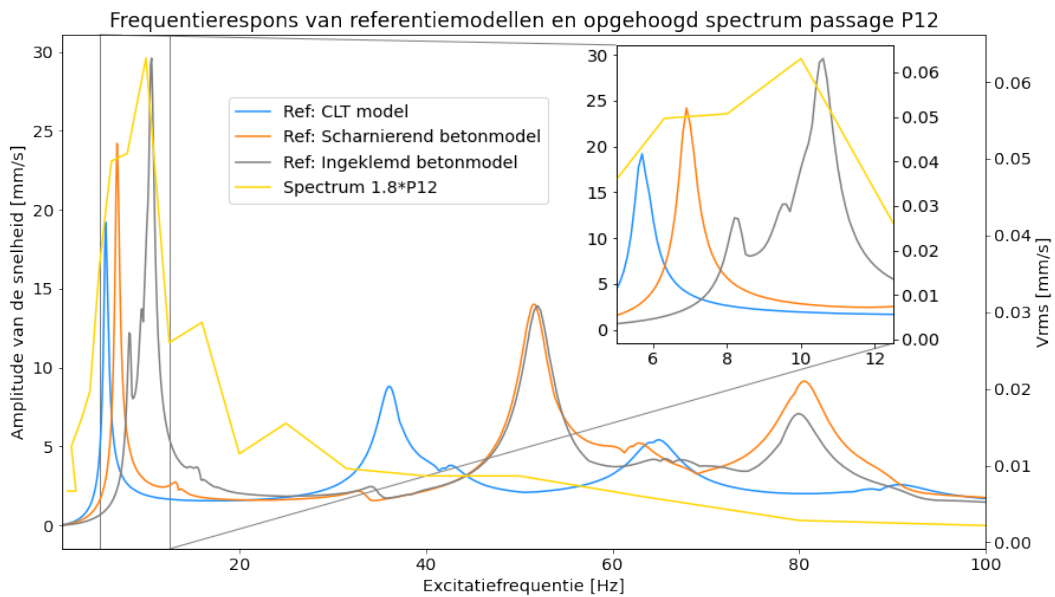
De spectra van de treinpassages in Arnhem laten een verhoogde intensiteit tussen de 6,3 Hz en 12,5 Hz met een maximum rond de 9 Hz zien. In Figuur 5.7 is de frequentierespons van de referentiemodellen weergegeven samen met het spectrum van de verhoogde goederentreinpassage P12. Hierbij is het frequentiedomein tussen 5 Hz en 12,5 Hz uitvergroet om de pieken van de referentiemodellen uit te lichten. Uit het figuur blijkt dat de drie referentiemodellen overlap hebben met de maatgevende frequentie van de treinpassage. Daarom wordt verwacht dat bij alle referentiemodellen trillingshinder aanwezig is. Verwacht wordt dat het CLT-referentiemodel leidt tot minder trillingshinder, omdat bijbehorende frequentierespons is gelokaliseerd in de staart van het spectrum van de treinpassage.

5.4.2. Prognose trillingshinder van modellen met ontwerpmaatregelen

Voor de modellen waarop ontwerpmaatregelen van toepassing zijn, zijn dezelfde prognoses uitgevoerd. In Bijlage F zijn de grafieken van de referentiemodellen en de modellen met ontwerpmaatregelen weergegeven, waarop de prognoses zijn uitgevoerd. Hieronder worden



Figuur 5.6: Vergelijking spectrale vermogensdichtheid originele meting van treinpassage P12 met het vijf keer verkleinde signaal.



Figuur 5.7: Vergelijking frequentierespons referentiemodellen met het spectrum van de opgehoogde goederentrein passage P12

enkel de afwijkende prognoses getoond.

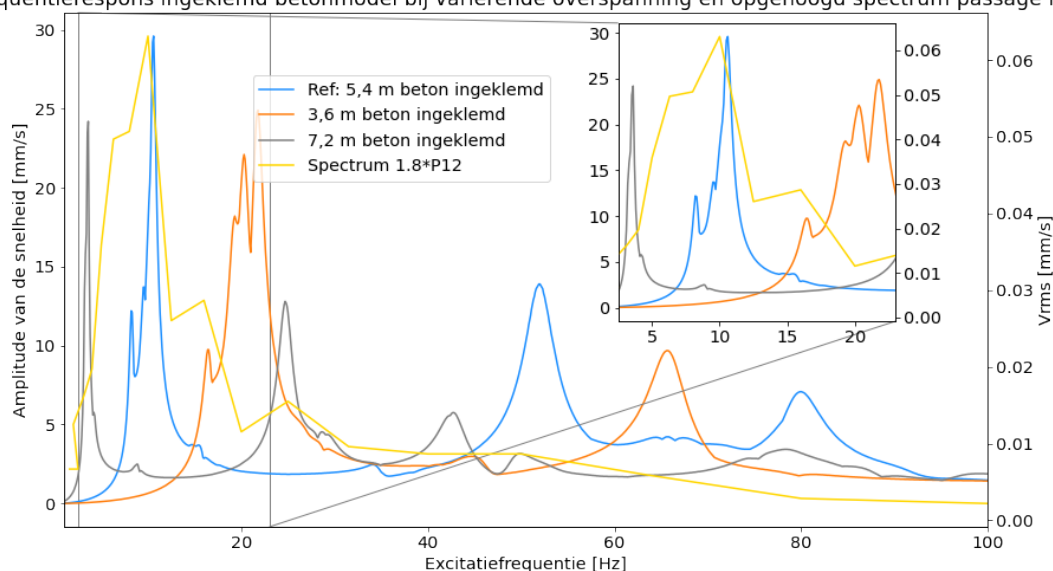
De ontwerpmaatregel waarbij de vloerdiktes worden gevarieerd, tonen resonantiepieken voor het CLT-model, het scharnierende betonmodel en het ingeklemde betonmodel overeenkomend met de maatgevende trillingssterkte van het gemeten spectrum. Daarom wordt verwacht dat voor de casus deze ontwerpmaatregel weinig tot geen reductie tonen van de trillingshinder. Wel wordt verwacht dat enige mate van reductie optreedt bij het toepassen van CLT-vloeren van 360 mm dik en betonvloeren van 367,5 mm dik, omdat deze zich in de staart van het maatgevende frequentiedomein bevindt. Het gevolg hiervan is dat de trillingssterkte

een factor 2 lager is dan de maximale trillingssterkte.

De ontwerpmaatregel waarbij wanddiktes worden gevarieerd, resulteren voor het CLT-model en het scharnierende betonmodel hoogstwaarschijnlijk niet tot een zodanige reductie van de trillingshinder dat het voldoet aan de richtlijn. Het verdikken van wanden bij het ingeklemde betonmodel zal resulteren in een reductie van de trillingshinder, maar zal niet leiden tot acceptatie van trillingshinder omdat de trillingssterkte relatief hoog is.

De ontwerpmaatregel waarbij de overspanning varieert lijkt met name voor het vergroten van de overspanning voor alle drie de modellen een zodanig effect te hebben dat het kan voldoen aan de richtlijn. Ter illustratie is Figuur 5.8 weergegeven, waarmee de prognose voor het ingeklemde betonmodel is gemaakt. De resonantiepiek van de vergrote overspanning komt bij alle drie de modellen nagenoeg overeen. Uit het figuur is te halen dat deze piek overeenkomt met een trillingsintensiteit van 0,02 mm/s. Vanwege deze lage trillingssterkte wordt een hoge reductie verwacht op de trillingshinder. Ditzelfde geldt voor het verkleinen van de overspanning van het ingeklemde betonmodel.

Frequentierespons ingeklemd betonmodel bij variërende overspanning en opgehoogd spectrum passage P12

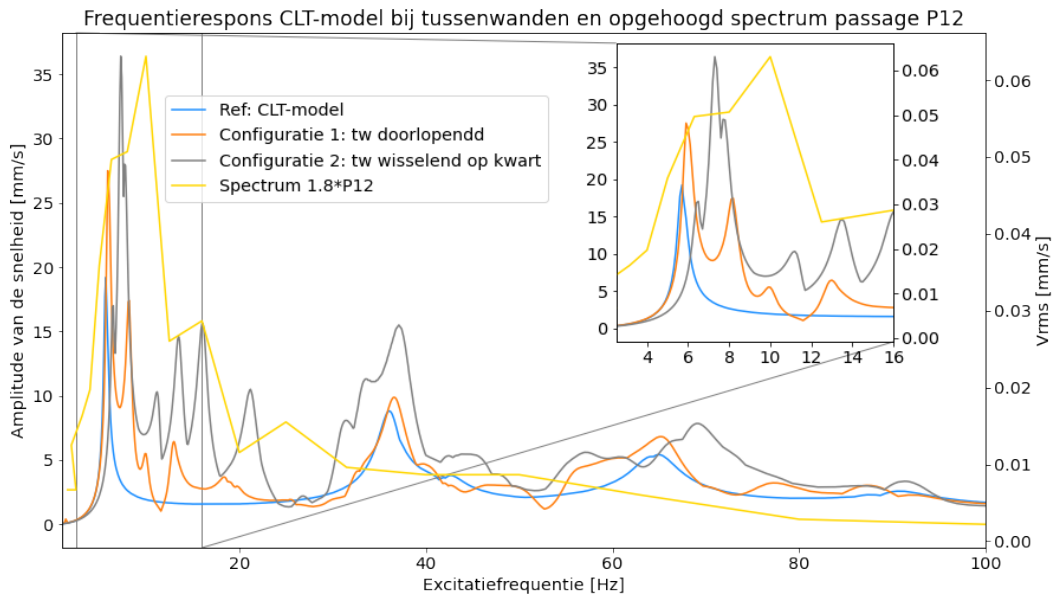


Figuur 5.8: Figuur voor de prognose ontwerpmaatregel variërende overspanning van het ingeklemde betonmodel.

De CLT-modellen waarbij tussenwanden zijn toegevoegd, tonen, behalve de eerste resonantiepiek, meerdere kleinere pieken die samenvallen met het maatgevende frequentiedomein van het maatgevende spectrum, zoals weergegeven in Figuur 5.9. Vanwege meerdere kleine resonantiepieken is het effect op trillingshinder lastiger te voorspellen. De prognose is dat het risico op trillingshinder afneemt, omdat dezelfde energie die afkomstig is van de trilling over meerdere pieken in plaats van over één piek moet worden verdeeld. Vanwege de hogere amplitudes bij tussenwand configuratie 2, wordt verwacht dat tussenwand configuratie 1 een beter effect zal hebben op de reductie van trillingshinder.

5.5. Kwantitatieve prognose trillingshinder

Door het vermenigvuldigen van amplitude van de resonantiepiek met het maatgevende spectrum wordt de voorspelling van trillingshinder gekwantificeerd. Het resultaat is een fictieve



Figuur 5.9: Figuur voor de prognose ontwerpmaatregel tussenwanden bij de CLT-model

waarde met de eenheid m^2/s^2 . Vervolgens is vergeleken wat de procentuele toe- of afname is van deze fictieve waarde vergeleken met de referentiemodellen. In zekere zin wordt verwacht dat de toe- of afname van de toetsing van trillingshinder aan de hand van de SBR dezelfde trend laat zien. In Tabel 1.1 van Bijlage I is de kwantitatieve prognose van de trillingshinder weergegeven.

De tabel toont voornamelijk een grote procentuele daling van circa 70% bij het variëren van de overspanning. Het toevoegen van tussenwanden geeft juist een grote stijging aan (50% en 119%). Omdat bij het product alleen de hoogste amplitude van de resonantiepiek is meegenomen, is de procentuele toename van de ontwerpmaatregelen tussenwanden geflatteerd. De extra pieken zijn namelijk niet beschouwd in de berekening.

5.6. Conclusie

Dit hoofdstuk geeft een beschrijving van de casus op de locatie nabij station Arnhem Centraal en geeft een prognose van het risico op trillingshinder. Twee meetlocaties, gelegen op respectievelijk 8 m en 45 m afstand van het spoor, zijn zorgvuldig gepositioneerd om een sterke correlatie met de excitatie op de fundering te waarborgen. Het spectrum, verkregen van een externe partij, vertoont een verhoogde trillingsintensiteit tussen de 6,3 Hz en 12,5 Hz, met een maximum rond 9 Hz. Dit maximum is afkomstig van goederentreinen op spoor 2.

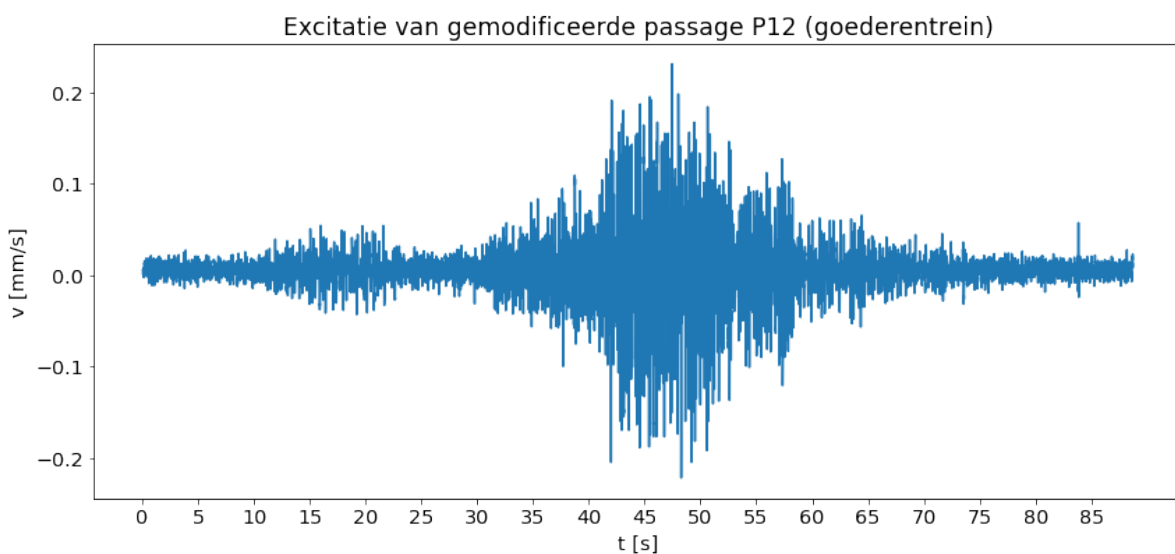
In relatie tot de frequentierespons blijkt dat de betonnen referentiemodellen een hoger risico hebben op trillingshinder vanwege de overlap tussen de frequentierespons en het maatgevende frequentiedomein. De reductie van trillingshinder bij het toepassen van ontwerpmaatregelen is ook voorspelt, waarbij met name wordt verwacht dat het aanpassen van de overspanning leidt tot acceptabele trillingshinder conform de SBR. Door de amplitudes en resonantiepieken met het maatgevende spectrum te vermenigvuldigen is een fictieve waarde berekend. Hiermee is een kwantitatieve prognose uitgevoerd op trillingshinder. Voornamelijk de ontwerpmaatregel met het variëren van overspanning leidt tot een dusdanige procentuele afname van de fictieve waarde.

Casus – toetsing van trillingshinder

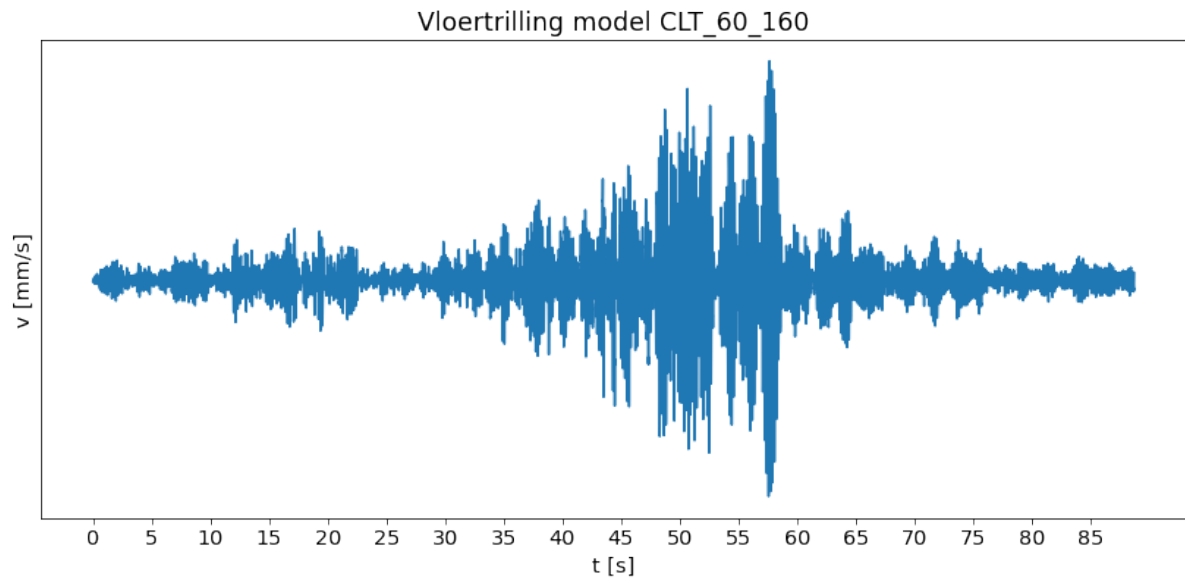
Hoofdstuk 6 beschrijft de resultaten voor het toetsen van het risico op trillingshinder door gebruik te maken van de SBR. Met deze toetsing is aangetoond dat de gepresenteerde methode voor het voorspellen van trillingshinder toepasbaar is op een specifieke locatie en daarmee op iedere locatie.

6.1. Trillingshinder referentiemodellen

Paragraaf 6.1 toetst van trillingshinder van de referentiemodellen. Voor het CLT-referentiemodel zijn de tussenstappen weergegeven, waarmee het tot stand komen van de effectieve voortschrijdende waarde wordt verduidelijkt. Voor de overige modellen is alleen de effectieve voortschrijdende waarde opgegeven. Alle relevante grafieken zijn per model weergegeven in Bijlage G. Deze toetsing begint met de excitatie van de maatgevende treinpassage. Figuur 6.1 presenteert het tijdsignaal van de verhoogde treinpassage P12. Deze excitatie is gebruikt als invoer in het eindig elementen model voor de lineaire tijdsafhankelijke analyses. De uitvoer van het eindig elementen model is weergegeven in Figuur 6.2 en representeert de maximale vloertrilling van het CLT-referentiemodel.

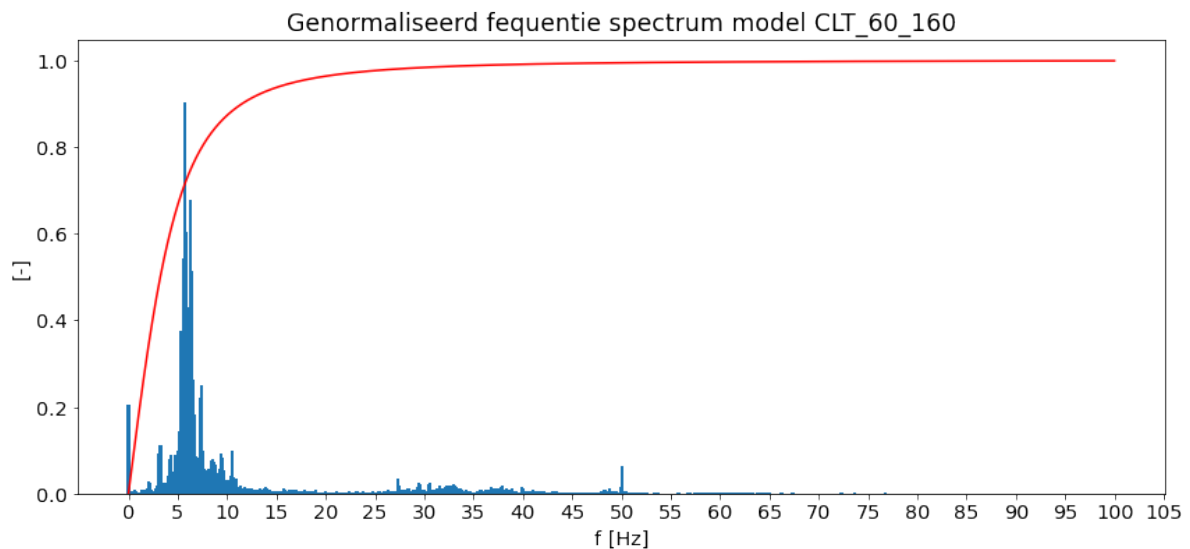


Figuur 6.1: Excitatie op fundering van de gemodificeerde treinpassage P12



Figuur 6.2: Vloertrilling CLT-referentiemodel

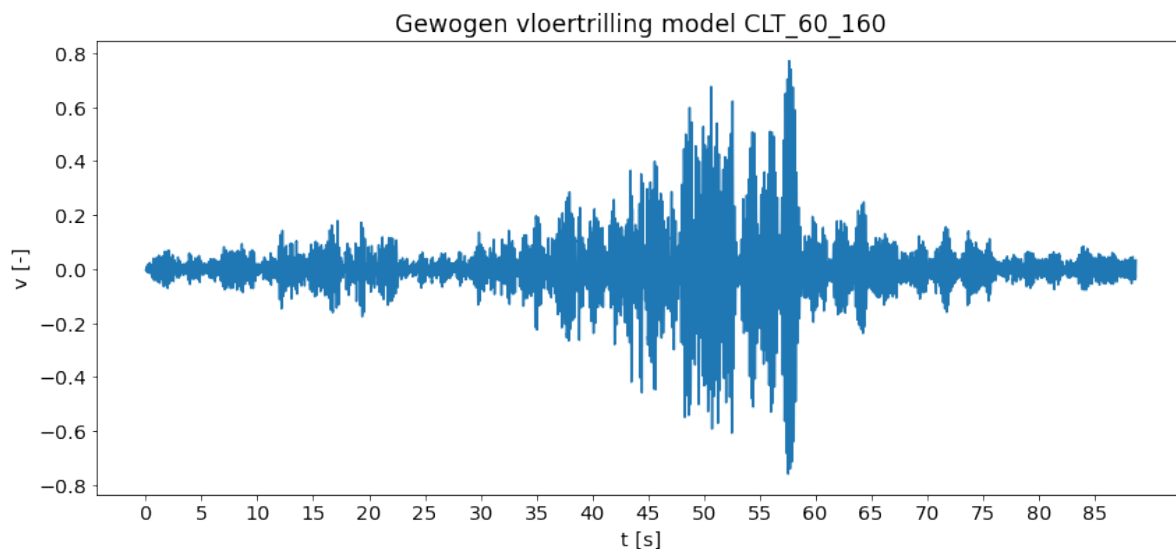
De vervolgstap is het omzetten van de maximale vloertrilling van het tijdsdomein naar het frequentiedomein. In Figuur 6.3 is het genormaliseerde frequentiespectrum weergegeven van de maximale vloertrilling van het CLT-referentiemodel. In het figuur is een duidelijke piek zichtbaar rond de 6 Hz. De rode lijn representeert de weegfunctie die de SBR voorschrijft. Hieruit is zichtbaar dat na ongeveer 16 Hz de weegfunctie constant loopt bij een factor van 1. Deze weegfunctie wordt toegepast om de lage frequenties die door het menselijke lichaam minder waarneembaar zijn te reduceren.



Figuur 6.3: Fourier transformatie CLT-referentiemodel

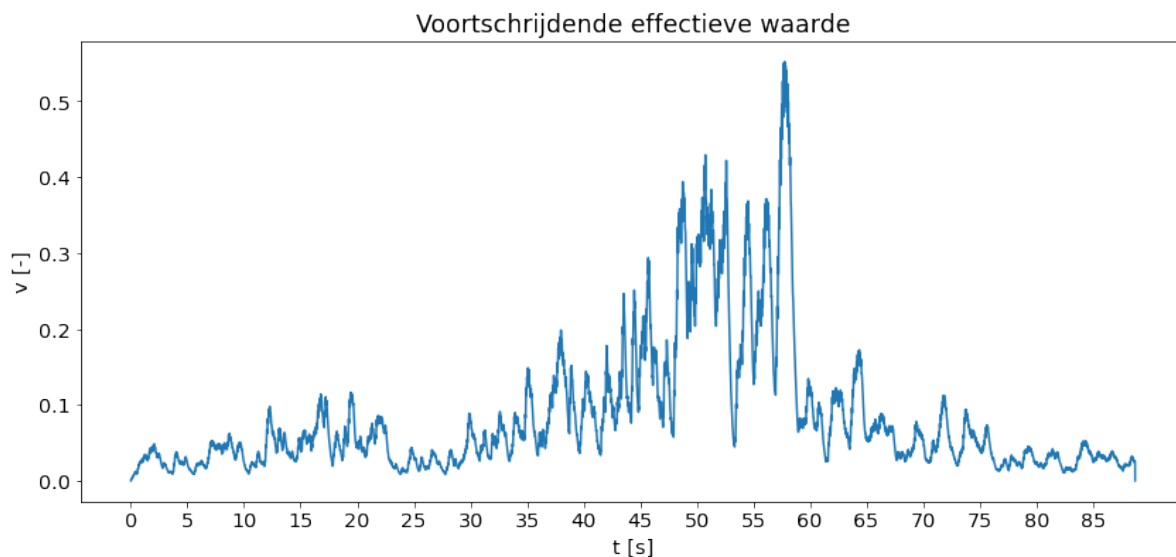
Nadat de weegfunctie is toegepast, is het frequentiespectrum terug getransformeerd naar het tijdsdomein en wordt de gewogen vloertrilling verkregen in Figuur 6.4. De maximale piek is door de weegfunctie gedaald van orde grootte 0,9 mm/s naar 0,8. Door de eenheid van de weegfunctie ($[s/mm]$) is de gewogen vloertrilling dimensieloos. De weegfunctie is gebruikt voor het reduceren van de trillingssterkte voor de niet-waarneembare frequenties. Daardoor

kunnen de amplitudes voor en na de weegfunctie alsnog met elkaar worden vergeleken, desondanks de afwijkende eenheid.



Figuur 6.4: Gewogen vloertrilling CLT-referentiemodel

Tot slot is de rms van de gewogen vloertrilling berekend. Het resultaat is de voortschrijdende effectieve waarde over het verloop van de tijd (zie Figuur 6.5). De maximale waarde uit dit figuur representeert V_{max} en wordt getoetst aan de streefwaarden uit de SBR. Tabel 6.2 geeft de V_{max} weer voor de referentie modellen. De maximale voortschrijdende waarde is getoetst aan de streefwaarde weergegeven in Tabel 6.1, waarbij is gekeken tijdens de nachtelijke periode.



Figuur 6.5: V_{eff} CLT-referentiemodel

Tabel 6.1: Streefwaarden woongebouw voor continue trillingen uit weg- en railverkeer

Situatie	Dag en avond			Nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Nieuw	0,1	0,4	0,05	0,1	0,2	0,05
Bestaand	0,2	0,8	0,1	0,2	0,4	0,1

Tabel 6.2: Maximale voortschrijdende effectieve waarde van de referentie modellen

	CLT-model	Scharnierend betonmodel	Ingeklemd betonmodel
	V_{max}	V_{max}	V_{max}
Ref	0,55	0,68	1,35

Geen van de referentiemodellen voldoet aan de SBR-richtlijn waarbij de uiterste streefwaarde A_2 in acht is genomen. Deze waarden zijn in de tabel in het rood aangegeven. Desalniettemin functioneert het CLT-referentiemodel het beste. Op basis van de hinderkwalificatie zouden de trillingen van beide scharnierende referentiemodellen met matige hinder worden gedefinieerd. De trilling van het ingeklemde betonnen referentiemodel wordt gedefinieerd met hinder.

6.2. Trillingshinder bij toepassing ontwerpmaatregelen

6.2.1. Vloerdikte

Bij de ontwerpmaatregel waarbij de dikte van de vloeren zijn aangepast, blijkt dat voor het CLT-model en het scharnierend betonmodel de trillingshinder significant toeneemt bij een vloerdikte van 175%. Daarentegen toont Tabel 6.3 voor het ingeklemde betonmodel een daling van de trillingshinder. Het toepassen van een vloerdikte van 225% voor het CLT-model resulteert in een afname van de trillingshinder vergeleken met een vloerdikte van 175%, desalniettemin is de trillingshinder 78% hoger vergeleken met het referentiemodel. Wederom zijn alle maximale voortschrijdende waardes weergegeven in Tabel 6.3 die groter zijn dan de maximale streefwaarde van 0,4. Met deze ontwerpmaatregelen voldoen de modellen niet aan de richtlijn voor wat betreft trillingshinder.

Tabel 6.3: Maximale voortschrijdende effectieve waarde van de maatregel: vloerdikte

Vloerdikte	CLT-model	Scharnierend betonmodel	Ingeklemd betonmodel
	V_{max}	V_{max}	V_{max}
100%	0,55	0,68	1,35
125%	0,55	0,61	1,42
175%	1,30	1,08	0,80
225%	0,98	-	-

6.2.2. Wanddikte

Het aanpassen van de wanddikte heeft voor de scharnierende modellen weinig effect op de trillingshinder. Tabel 6.4 toont voor het ingeklemde betonmodel echter een verlaging van de trillingshinder. Desalniettemin is deze maximale voortschrijdende waarde hoger dan de maximale streefwaarde uit de SBR en zodoende voldoet deze maatregelen niet aan de richtlijn voor wat betreft trillingshinder.

Tabel 6.4: Maximale voortschrijdende effectieve waarde van de maatregel: Wanddikte

Wanddikte	CLT-model	Scharnierend betonmodel	Ingeklemd betonmodel
	V_{max}	V_{max}	V_{max}
100%	0,55	0,68	1,35
200%	0,58	0,67	0,91
333%	0,58	0,61	0,74

6.2.3. Overspanning

Het ontwerpen van een kleinere overspanning resulteert voor de scharnierende CLT- en betonmodellen in een stijging van de trillingshinder. Voor het ingeklemde betonmodel zorgt het juist voor een reductie van trillingshinder. Dit is zodanig dat het voldoet aan de richtlijn voor wat betreft trillingshinder bij de bestaande situaties. In Tabel 6.5 zijn de V_{max} en V_{per} getoond. Is V_{max} lager dan de streefwaarde A_2 voor nieuwe of bestaande situaties, dan is deze oranje weergegeven. Is V_{per} lager dan de streefwaarde A_3 , dan is deze groen weergegeven. Het blijkt dat het vergroten van de overspanning voor het CLT-model voldoet aan de richtlijn voor wat betreft trillingshinder voor zowel bestaande als nieuwe situaties. De betonnen modellen voldoen aan de SBR wanneer wordt gekeken naar bestaande situaties.

Tabel 6.5: Maximale voortschrijdende effectieve waarde van de maatregel: Overspanning

Overspanning	CLT-model		Scharnierend betonmodel		Ingeklemd betonmodel	
	V_{max}	V_{per}	V_{max}	V_{per}	V_{max}	V_{per}
5,4 m	0,55		0,68		1,35	
3,6 m	0,97		0,83		0,32	0,010
7,2 m	0,12	0,012	0,32	0,034	0,21	0,022

6.2.4. Tussenwanden

De ontwerpmaatregel waarbij tussenwanden aan het CLT-model zijn toegevoegd heeft geresulteerd in een vermindering van trillingshinder. Uit Tabel 6.6 blijkt echter dat de tussenwand configuratie 2, waarbij per verdieping twee tussenwanden diagonaal van elkaar zijn geplaatst, een dusdanig laag effect heeft op de trillingshinder dat het niet voldoet aan de richtlijnen van de SBR. Daarentegen voldoet de tussenwand configuratie 1, waarbij de wand in het midden van het gebouw over de hele lengte doorloopt, wel aan de SBR-richtlijnen met betrekking tot bestaande situaties.

Tabel 6.6: Voortschrijdende effectieve waarde van de maatregel: Tussenwanden

Tussenwanden	CLT-model	
	V_{max}	V_{per}
Geen tussenwanden	0,55	
Configuratie 1: doorlopend	0,28	0,028
Configuratie 2: wisselend	0,5	

6.3. Relatie tussen toetsing en kwantitatieve prognose

De procentuele toename van de toetsing op het risico van trillingshinder is vergeleken met de procentuele toename van de kwantitatieve prognose. Tabel 1.2 in Bijlage I toont deze vergelijking. Het blijkt dat de kwantitatieve prognose grotendeels dezelfde trend toont als de procentuele toename van de toetsing aan de SBR. Het absolute procentuele verschil wijkt grotendeels tot maximaal 25% af. De kwantitatieve prognose onderschat de procentuele toename van ontwerpmaatregelen met een resonantiepiek rond de 10 Hz en 12 Hz. Dit resulteert in een onderschatting van 50% tot 88%. De ontwerpmaatregelen met tussenwanden geven zoals verwacht een geflatteerd verschil weer tussen de prognose en de toetsing aan de SBR. Het verschil in toe- of afname bedraagt 99% en 128%. Dit heeft te maken met het feit dat enkel de maximale amplitude van de omhullende frequentierespons is beschouwd.

6.4. Conclusie

In dit hoofdstuk zijn de CLT- en betonmodellen getoetst op trillingshinder op basis van de SBR voor de casus in Arnhem. Alle drie de referentiemodellen voldoen niet aan de gestelde voorwaarde uit de SBR voor trillingshinder. Ook de ontwerpmaatregelen voor de vloerdikte, de wanddikte en de tussenwand configuratie 2 leiden niet tot een dusdanige reductie dat de modellen voldoen aan de SBR. De ontwerpmaatregelen voor het vergroten van de overspanning en de tussenwand configuratie 1 leiden wel tot een dusdanige reductie zodat het voldoet aan de richtlijn met betrekking tot de bestaande situatie. Voor een overspanning van 7,2 m voldoet het CLT-model zelfs voor nieuwe situaties. Ook de ontwerpmaatregel voor het verkleinen van de overspanning naar 3,6 m resulteert bij het ingeklemde betonmodel voor een zodanige reductie van de trillingshinder dat het voldoet aan de SBR.

De kwantitatieve prognose en de toename van het risico op trillingshinder tonen voor de meeste ontwerpmaatregelen dezelfde trend. In absolute zin is het maximale verschil 25%, behalve voor de ontwerpmaatregelen met een resonantiepiek rond de 10 Hz en 12 Hz. Deze worden bij de kwantitatieve prognose onderschat.

7

Discussie, conclusie en aanbevelingen

7.1. Discussie

Wetenschappelijke relevantie

Dit is het eerste onderzoek dat een methode opstelt, waarmee het risico op trillingshinder voor verschillende ontwerpmaatregelen in CLT-woongebouwen kan worden voorspeld. Aan de hand van een casus is bewezen dat ontwerpmaatregelen die betrekking hebben op de modificatie van het ontwerp toepasbaar zijn voor het reduceren van het risico op trillingshinder. Aan de hand van de beschreven methode zou de effectiviteit van andere ontwerpmaatregelen ook aangetoond kunnen worden, zoals gestemde massadempers. Vanwege de smalle resonantiepieken van de referentiemodellen wordt verwacht dat gestemde massadempers op de vloeren effectief kunnen zijn. De daadwerkelijke effectiviteit van gestemde massadempers of andere ontwerpmaatregelen dient verder onderzocht te worden.

Limitaties

Uit dit onderzoek komt naar voren dat de berekende CLT-wanden met een dikte van 60 mm en 80 mm onvoldoende rotatiecapaciteit hebben voor het significant beïnvloeden van de eigenfrequentie bij ingeklemde vloer-wandaansluitingen. Het gevolg is dat de effectiviteit van het modelleren van een dubbele beuken en ingeklemde vloeren zeer gering is. Echter, wanneer de dikte van de wanden wordt vergroot neemt de effectiviteit significant toe, in combinatie met momentvaste verbindingen. Ook stijgt door het verdikken van de wand de stijfheidsverhouding tussen de wand en de vloer, dat resulteert in een stijging van het buigende moment van 2 kNm naar 12 kNm. Verbindingen met zodanige capaciteit worden in de praktijk zelden toegepast vanwege de hoge kosten. Daarom zijn in dit onderzoek alleen scharnierende CLT-modellen gemodelleerd. Uiteindelijk zou het onderzoek naar economisch haalbare momentvaste verbindingen kunnen leiden tot grotere effectiviteit van het variëren van wanddikte. Waardoor vervolgens trillingshinder gereduceerd kan worden.

In het onderzoek is gebleken dat de frequentierespons enkel pieken toont gerelateerd aan de oneven trilvormen. De reden hiervoor is, dat de excitatie gelijktijdig aan beide opleggingen is aangeboden. Maar een gebouw kan een dusdanige breedte hebben dat de excitatie significant later bij verschillende gedeeltes van de fundering aan komt. In deze gevallen bestaat de kans dat ook even trilvormen waarneembaar worden in de frequentierespons. Dit is bij het onderzochte gebouw niet aan de orde, waardoor het gelijktijdig aanbrenge van de excitatie is geoorloofd.

Door het gebruik van de omhullende frequentierespons gaat informatie van specifieke vloerlocaties verloren. Het beschouwen van de omhullende frequentierespons is echter wel een bovengrens benadering voor alle geselecteerde locaties. Wanneer de maatgevende resonantiepiek van de frequentierespons van verschillende locaties significant afwijkt, kan dit leiden tot een onjuiste voorspelling van de reductie van trillingshinder. Bij de ontwerpmaatregel tussenwand configuratie 2, blijkt een afwijking te zitten. Verschillende locaties van de vloer resulteren in verschillende pieken bij de frequentierespons. Om toch de omhullende te kunnen gebruiken, moeten de locaties die verschillende pieken aangeven apart worden gegroepeerd. Dit is in het onderzoek niet gedaan en daardoor is het voorspellen van trillingshinder voor deze ontwerpmaatregel niet nauwkeurig.

De amplitudes van de frequentierespons van de betonmodellen tonen bij het variëren van de vloerdikte onverwachte waarden. Verwacht werd dat de amplitudes voor de tweede resonantiepiek van de kleinste tot aan de grootste plaatdikte gelijkmatig toe- of afneemt. Dit is bij deze modellen niet aan de orde. De numerieke modellen zijn gecontroleerd op invoer en is juist voor alle modellen. Een frequentierespons analyse met een vloerdikte van 400 mm toont een amplitude die in dezelfde lijn als de amplitude van de modellen met een vloerdikte van 262,5 mm en 367,5 mm ligt. Een oorzaak van de afwijkende amplitude van de betonnen referentiemodellen kan zijn, dat de resonantiepiek van de vloeren dezelfde frequentie heeft als een van de eigenfrequentie van de betonwanden.

In het onderzoek resulteren de meeste ontwerpmaatregelen in een stijging van de eigenfrequentie. Daarbij ligt de maatgevende excitatiefrequentie hoger dan resonantiepieken van de referentiemodellen. Als gevolg van het toepassen van ontwerpmaatregelen verschuiven de resonantiepieken naar een hogere frequentie, waardoor de maatgevende excitatiefrequentie en de resonantiepiek meer overlap hebben, dat zorgt voor een hogere kans op trillingshinder. Daarom dient de methode voor het voorspellen van trillingshinder ook op andere locaties toegepast te worden waarbij het spectrum van de treinpassages een variërende maatgevende frequentiedomein heeft.

Voor de kwantitatieve prognose bestaat uit het product van de amplitude van de resonantiepieken en de trillingssterkte van het maatgevende spectrum. De afwijking van de prognose met de toe- of afname van het risico op trillingshinder verschilt met maximaal 25%. Wel toont deze methode een gelijke trend in toe- of afname. Om het procentuele verschil te reduceren wordt geadviseerd om te zoeken naar een betere relatie in deze methode is gehanteerd.

De toetsing aan de SBR toont over het algemeen een goede overeenkomst met de prognose van de frequentierespons, met uitzondering van ontwerpmaatregelen met resonantiepieken rond 10 Hz en 12 Hz. Een voorbeeld hiervan is de ontwerpmaatregel waarbij een CLT-vloerdikte van 360 mm is toegepast. De prognose van deze ontwerpmaatregel zou moeten leiden tot het verminderen van het risico op trillingshinder, maar het risico neemt toe. Tussen 10 Hz en 12,5 Hz is een sterke daling van het maatgevende spectrum zichtbaar. Terwijl in Figuur 5.6a in Hoofdstuk 5 een verhoogde intensiteit rond 12 Hz zichtbaar is. In Bijlage H is gebleken dat het toepassen van een derde octaafbanden resulteert in het wegvallen van pieken en dalen, die wel in de Fourier transformatie zichtbaar zijn. Het toepassen van het kwadratisch gemiddelde blijkt uit de bijlage significant minder effect te hebben op de pieken en dalen van de Fourier transformatie. Het toepassen van een derde octaafbanden maakt de methode minder betrouwbaar. Daarom wordt voor het maken van een prognose geadviseerd om spectra te gebruiken waarbij een derde octaafbanden niet zijn toegepast.

De keuze van de casus heeft een aantal consequenties voor de resultaten met betrekking tot de reductie van het risico op trillingshinder. Ten eerste toont het spectrum dominante lage frequenties afkomstig van goederentreinen. Bij het wegvallen van goederentreinen zal enerzijds de trillingssterkte reduceren. Ook zal het maatgevende frequentiedomein van het spectrum verschuiven naar hogere frequenties, waardoor minder overlap met de frequentierespons ontstaat. Dit zal leiden tot een lager risico op trillingshinder.

Ten tweede is de passage gekozen die het rekenspectrum van MP5 op 48 m van spoor 2 benaderd. Zoals in Hoofdstuk 5 toegelicht verschilt de trillingssterkte van MP2 een factor 1,4-4,5 hoger. Als gekozen was voor een tijdsignaal gemeten vanaf MP2, had dit hoogstwaarschijnlijk ook tot groter risico op trillingshinder geleid.

Ten derde is de casus gesitueerd nabij een station, hierdoor is de rijnsnelheid van de treinen zeer beperkt. Ook zijn locaties denkbaar waarbij de rijnsnelheid boven de 100 km/u is. Dit kan gevolgen hebben, voornamelijk voor de dynamische contributie van de trein-geïnduceerde trilling. Het gevolg hiervan kan de frequentie-inhoud en trillingssterkte van het trein-geïnduceerde spectrum veranderen.

Maatschappelijke relevantie

Aan de hand van de casus is de toepasbaarheid van de methode bewezen. Hierdoor is de methode toepasbaar op werkelijke nieuwbouwprojecten naast het spoor in Nederland. Waardoor het onderzoek bijdraagt aan het oplossen van de woningnood.

Door het toepassen van CLT in dit onderzoek is de mogelijkheid geboden om trillingshinder te reduceren door gebruik te maken van een duurzaam materiaal waarvan de koolstof-voetafdruk lager is dan de conventionele bouwmaterialen [8]. Het gevolg is dat CLT toegepast kan worden bij de nieuwbouwprojecten, waardoor dit onderzoek ook bijdraagt aan het verduurzamen van de bouwsector.

7.2. Conclusie

In dit onderzoek wordt antwoord gegeven op de volgende onderzoeksvraag *"Welke ontwerpmaatregelen zorgen voor een zodanige reductie van trein-geïnduceerde trillingen in CLT en betonnen woongebouwen, dat deze voldoen aan de toepasbare richtlijnen?"*

De vraag is beantwoord door een methodiek op te stellen waarmee hinder gegeven een trein-geïnduceerde trilling kan worden voorspeld. Hiervoor zijn numerieke modellen voor het CLT- en betongebouw opgesteld. Voornamelijk het numerieke CLT-model vergt aandacht voor het in rekening brengen van orthotrope eigenschappen. Op basis van verschillende type modellen dient een specifieke rekenmethode gekozen te worden. Voor topologische eendimensionale modellen, zoals balkmodellen, is de Gamma-methode zeer geschikt voor het toekennen van orthotropie. Orthotropie bij topologische tweedimensionale modellen, zoals plaatmodellen, dient toegevoegd te worden in de matrix met constitutieve relaties. Beton heeft isotrope materiaaleigenschappen. Dit leidt niet tot specifieke invoer, anders dan gebruikelijk in numerieke programma's.

Op verschillende niveaus kunnen ontwerpmaatregelen getroffen worden voor het reduceren van trillingen. Het blijkt dat aanpassingen aan de vloerdikte, de wanddikte en de overspanning het meeste effect hebben op de eigenfrequentie van het woongebouw.

De relevante frequenties voor CLT- en betonnen woongebouwen zijn voornamelijk te relateren aan de eerste trilvorm van de vloeren. Door het toepassen van ontwerpmaatregelen verschuift de relevante frequentie. Met de toegepaste ontwerpmaatregelen variëren de relevante frequenties voor het CLT-model tussen de 2,8 Hz en 11,8 Hz. Bij de betonmodellen variëren de relevante frequenties tussen de 3,1 Hz en de 21,8 Hz.

Het beoordelen van trillingshinder kan worden uitgevoerd via verschillende internationale en

ationale richtlijnen. Uit de literatuur blijkt dat een richtlijn waarbij de beoordeling is uitgevoerd door middel van het gewogen kwadratisch gemiddelde, geschikt is voor de beoordeling van het risico op trillingshinder. Vanwege het feit dat het onderzoek is gericht op Locaties in Nederland, leent de SBR richtlijn-B zich tot een geschikte methode voor het beoordelen van trillingshinder.

Bij overlap van de relevante frequenties samen met het spectrum van de trein-geïnduceerde trilling kan een kwalitatieve prognose gemaakt worden waarmee het risico op trillingshinder wordt voorspeld. Door middel van het vermenigvuldigen van de amplitude behorende bij de relevantie frequentie met de trillingssterkte van het gemeten spectrum van de trein-geïnduceerde trilling wordt de prognose gekwantificeerd. Het blijkt dat het risico op trillingshinder tot een verschil van 25% voorspeld kan worden. De kwantitatieve voorspelling geeft een onderschatting voor ontwerpmaatregelen met een relevante frequentie rond de 10 Hz en 12 Hz.

Met deze informatie zijn de resultaten tot stand gekomen waarmee de hoofdvraag is beantwoord. Alle drie de referentiemodellen voldoen niet aan de gestelde voorwaarde uit het SBR voor wat betreft de trillingshinder. Voor het CLT-model zijn twee ontwerpmaatregelen van toepassing die wel resulteren tot een reductie van het risico op trillingshinder, zodat aan de voorwaarden vanuit de SBR wordt voldaan. Dit zijn de ontwerpmaatregelen waarbij de overspanning wordt vergroot en tussenwanden zijn toegepast over de gehele hoogte van het gebouw. Bij de betonmodellen geldt dat alleen aanpassing van de overspanning zorgt voor een reductie van het risico op trillingshinder dat wordt voldaan aan de SBR-richtlijn. De resultaten van het onderzoek zijn locatiespecifiek en kunnen resulteren tot andere resultaten bij een alternatieve locatie.

7.3. Aanbevelingen

Naar aanleiding van het onderzoek zijn de volgende aanbevelingen voor de toepassing van de methode en vervolgonderzoek aanbevolen.

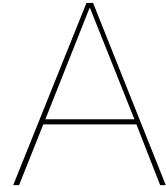
- Bewezen is dat de methode voor het voorspellen van trillingshinder toepasbaar is voor een specifieke locatie. Aanbevolen wordt het gebruik van deze methode op meerdere locaties toe te passen.
- Het spectrum van de trein-geïnduceerde trilling dient de volledige trillingsintensiteit van de frequentie-inhoud te tonen. Daarom wordt de toepassing van een derde octaafbanden afgeraden bij het maken van de prognose.
- Geadviseerd wordt voor de kwantitatieve prognose om een ander verband toe te passen dan het product van de amplitude van de resonantiepiek en het spectrum. Hierdoor kan het verschil van 25% gereduceerd worden.
- De toegepaste ontwerpmaatregelen, hebben betrekking op de modificaties van het ontwerp. Additionele ontwerpmaatregelen, zoals gestemde massadempers, kunnen gezien de aard van de frequentierespons kansen bieden voor het reduceren van de eerste of tweede resonantiepiek. Daarom wordt geadviseerd om onderzoek te doen naar meerdere effectieve maatregelen met het gebruik van de beschreven methode uit dit onderzoek.
- Voor het ontwerpen van CLT-woongebouwen met een laag risico op trillingshinder, wordt geadviseerd beuken te ontwerpen met een eigen stabiliteitssysteem. Ook wordt geadviseerd om brede stramienen te ontwerpen. Maar woongebouwen met dubbele beuken heeft weinig effect om trillingshinder te reduceren.

Literatuurlijst

- [1] Léon Groenemeijer. *Het statistisch woningtekort nader uitgelegd*. 2021. URL: <https://abfresearch.nl/publicaties/het-statistisch-woningtekort-nader-uitgelegd/>.
- [2] NOS Nieuws. *Grote bouwcoalitie presenteert actieplan voor 1 miljoen woningen in tien jaar*. 2021. URL: <https://nos.nl/artikel/2369043-grote-bouwcoalitie-presenteert-actieplan-voor-1-miljoen-woningen-in-tien-jaar>.
- [3] Jan Ritsema van Eck, Joost Van Gemeren en Corina Huisman. *PBL 2015 WLO vier beelden van de regionale ontwikkeling van Nederland tot 2050*. 2015.
- [4] DUIC. *Bouwen, bouwen en bouwen; hier wordt in 2022 gebouwd in Utrecht*. 2022. URL: <https://www.duic.nl/algemeen/bouwen-bouwen-en-bouwen-hier-wordt-in-2022-gebouwd-in-utrecht/>.
- [5] Melt Pels. *Amersfoort bouwt 3000 nieuwe woningen langs de Eem en het spoor*. 2021. URL: <https://indebuurt.nl/amersfoort/gemeente/amersfoort-bouwt-3000-nieuwe-woningen-langs-de-eem-en-het-spoor~114318/>.
- [6] Kirsten Spooren. *Verkoop gestart nieuwbouwappartementen aan de Spoorzone*. 2022. URL: <https://indebuurt.nl/gouda/wonen/nieuwbouw/verkoop-gestart-nieuwbouwappartementen-aan-de-spoorzone~150401/>.
- [7] Elma Durmisevic e.a. *Systemic view on reuse potential of building elements, components and systems*. 2017.
- [8] Elisabeth Keijzer e.a. *Een verkenning van het potentieel van tijdelijke CO2-opslag bij houtbouw*. TNO, 2021.
- [9] I. van Kamp e.a. *Wonen langs het spoor: Gezondheidseffecten van trillingen door treinen*. 2014.
- [10] T. Klumper e.a. *Handreiking Nieuwbouw en Spoortrillingen*. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2019.
- [11] M. Fragiaco, B. Dujic en I. Sustersic. „Elastic and ductile design of multi-storey cross-lam massive wooden buildings under seismic actions”. In: *Engineering Structures* 33 (11 nov 2011), p. 3043–3053. ISSN: 01410296. DOI: [10.1016/j.engstruct.2011.05.020](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.05.020).
- [12] „Seismic behaviour of Cross-Laminated Timber structures: A state-of-the-art review”. In: *Engineering Structures* 170 (2018), p. 42–52. ISSN: 0141-0296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.060>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029617338361>.
- [13] Ario Ceccotti en Maurizio Follesa. *Seismic behaviour of multi-storey XLam buildings*. 2006.
- [14] J. Weckendorf. „Dynamic response of CLT plate systems in the context of timber and hybrid construction”. In: *Composite Structures* (2016).
- [15] J. Weckendorf e.a. „Vibration serviceability performance of timber floors”. In: (2016).
- [16] Nathalie Labonnote. „Vibration properties of cross laminated timber floors”. In: (2010).

- [17] Yasser E. Ibrahim en Marwa Nabil. „Finite element analysis of multistory structures subjected to train-induced vibrations considering soil-structure interaction”. In: *Case Studies in Construction Materials* 15 (dec 2021).
- [18] Alessandro Bracci. *Assessment of Stiff Trench and Metawedge as Mitigation Measures for Railway Induced Ground Vibration*. Mitigation measurements aiganst train induced vibrations. 2021.
- [19] R. Brandner e.a. „Cross laminated timber (CLT): overview and development”. In: *European Journal of Wood and Wood Products* 74 (3 mei 2016), p. 331–351. ISSN: 1436736X. DOI: [10.1007/s00107-015-0999-5](https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5).
- [20] G.J.P. Ravenshorst. personal communication. 22 sep 2020.
- [21] proHolz. *Cross-Laminated Timber Structural Design: Basic design and engineering principles according to Eurocode*. 2014. URL: www.proholz.at.
- [22] Eric Borgström en Johan Froöbel. *The CLT Handbook*. Svenskttra, mei 2019.
- [23] proHolz. *Cross-Laminated Timber Structural Design: Applications*. 2018.
- [24] Geert Lombaert e.a. „Ground-borne vibration due to railway traffic: a review of excitation mechanisms, prediction methods and mitigation measures”. In: (2015), p. 253–287.
- [25] D.P. Connolly e.a. „Benchmarking railway vibrations – Track, vehicle, ground and building effects”. In: *Construction and Building Materials* 92 (2015). Railway Engineering-2013, p. 64–81. ISSN: 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.042>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814007661>.
- [26] C.J.C. Jones en J.R. Block. „PREDICTION OF GROUND VIBRATION FROM FREIGHT TRAINS”. In: *Journal of Sound and Vibration* 193.1 (1996), p. 205–213. ISSN: 0022-460X. DOI: <https://doi.org/10.1006/jsvi.1996.0260>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X96902606>.
- [27] David Thompson. „Chapter 12 - Low Frequency Ground Vibration□”. In: *Railway Noise and Vibration*. Red. door David Thompson. Oxford: Elsevier, 2009, p. 399–435. ISBN: 978-0-08-045147-3. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045147-3.00012-8>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080451473000128>.
- [28] J. Negreira e.a. „Psycho-vibratory evaluation of timber floors - Towards the determination of design indicators of vibration acceptability and vibration annoyance”. In: *Journal of Sound and Vibration* 340 (mrt 2015), p. 383–408. ISSN: 10958568. DOI: [10.1016/j.jsv.2014.12.001](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2014.12.001).
- [29] International Organization for Standardization. *ISO 2631-1:1997, Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration — Part 1: General requirements*. 1997.
- [30] Stichting Bouwresearch. *Trillingen meet- en beoordelingsrichtlijnen Deel B: Hinder voor personen in gebouwen*. 2006.
- [31] European Committee for Standardization. *Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings*. 2011.
- [32] Merel Vos e.a. *CROSS TIMBER LAMINATED - HANDLEIDING VOOR ARCHITECTEN*. 2021. URL: www.inbo.com.
- [33] European Committee for Standardization. *Eurocode 0 - Basis of structural design*. 2002.

- [34] European Committee for Standardization. *National Annex to NEN-EN 1991-1-1+C1+C11: Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings*. 2019.
- [35] European Committee for Standardization. *National Annex to NEN-EN 1991-1-4+A1+C2: Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions*. 2019.
- [36] Hamm Patricia en Francois Colling. *Verbesserung der Praxistauglichkeit der Baunormen durch pränormative Arbeit-Teil Antrag 4: Holzbau*. 2017.
- [37] RWTH Aachen University e.a. *Hivoss: Trillingen van vloeren*. 2007.
- [38] DB SchenkerRAIL AG. personal communication. Mrt 2009.



Berekening CLT en beton elementen

In deze bijlage zijn de dimensies van de CLT en betonnen elementen bepaald. Hierbij is de Eurocode leidend. Verschillende permanente en veranderlijke belastingen zijn in het model meegenomen. Ook is een controle uitgevoerd naar het scheuren van beton in de bruikbaarheidsgrenstoestand.

A.1. Uitgangspunten

Het woongebouw is berekend in gevolgklasse 2, conform de Eurocode 0 artikel B3.1(1)[33]. De veranderlijke belasting van de verdiepingsvloeren is aangehouden conform Eurocode 1-1 artikel 6.3.1.2(1) [34]. De windbelasting op de buitenwanden is bepaald conform de Eurocode 1-4 artikel 5.3(1) in windgebied klasse I, onbebouwd [35]. Rekening houdend met akoestische eigenschappen is bovenop de constructieve vloer een zwevende dekvloer ontworpen. In Tabel A.1 staat een overzicht van de gehanteerde belastingen. Het ontwerp van de betonnen en

Tabel A.1: Overzicht belastinggevallen

Belastinggeval	Permanent	Variabel
Eigengewicht	$G_{k,1}$	
Zwevende vloer	$G_{k,2} = 1,265kN/m^2$	
Wind		$Q_{k,1} = 1,40kN/m^2$
Verdiepingsvloer		$Q_{k,2} = 1,75kN/m^2$

CLT modellen zijn getoetst in de uiterste grenstoestand (UGT) en de bruikbaarheidsgrenstoestand (BGT). Vergelijking (A.1) tot en met (A.4) geven de vergelijkingen weer voor het bepalen van de optredende belasting per fase. Voor de UGT moet de grootste waarde van vergelijking 6.10a of 6.10b zijn aangehouden.

$$UGT_{6.10a} : \quad E_d = 1,2 \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + 1,5 \psi_{0,1} Q_{k,1} \quad + 1,5 \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (\text{A.1})$$

$$UGT_{6.10b} : \quad E_d = 1,3 \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + 1,5 Q_{k,1} \quad + 1,5 \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (\text{A.2})$$

$$BGT \quad E_k = 1,0 \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + 1,0 Q_{k,1} \quad + 1,0 \sum_{i > 1} Q_{k,i} \quad (\text{A.3})$$

$$BGT_{quasi\ permanent} : \quad E_{Qp} = 1,0 \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + 1,0 \psi_{2,1} Q_{k,1} \quad + 1,0 \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (\text{A.4})$$

$$\text{Met: } \psi_0 = 0,4 \quad \psi_1 = 0,5 \quad \psi_2 = 0,3$$

A.2. Berekening CLT elementen

De hoofddragconstructie van het woongebouw bestaat uit een combinatie van dragende wanden en vloeren. De dikte van de vloer elementen is bepaald aan de hand van de buigspanning in de (UGT) en de doorbuigingstoets in de (BGT). De wanddiktes zijn bepaald op basis van de axiale spanning en buigspanning in de UGT; hierbij is een reductie op de axiale spanning ten gevolge van knik.

Rekening houdend met akoestische detaillering zijn de modellen uitgevoerd met enkele of dubbele woning-scheidende wanden. Richtlijnen met betrekking tot trillingen zijn niet meegenomen bij het toetsen van de hoofddragconstructie. Hierdoor is voorkomen dat het model op voorhand voldoet aan de trillingseisen en dat de maatregelen daardoor overbodig zijn. In tabel A.2 zijn de eigenschappen weergegeven waarop de dimensies van de CLT elementen zijn berekend. De UGT-toets voor de vloeren is gebaseerd op de maximale spanning in de

Tabel A.2: Materiaaleigenschappen CLT met houtkwaliteit C24

Eigenschappen	Symbool	Waarde	
Elasticiteitsmodulus [21]	$E_{0,gem}$	11000	N/mm ²
Elasticiteitsmodulus [21]	$E_{0,05}$	9160	N/mm ²
Glijmodulus [21]	$G_{0,gem}$	690	N/mm ²
Rol-afschuifmodulus [21]	$G_{R,gem}$	50	N/mm ²
Dichtheid [21]	ρ	450	kg/m ³
Buigspanning [31]	$f_{m,k}$	24	N/mm ²
Drukspanning [31]	$f_{c,0,k}$	21	N/mm ²
Modificatie factor [21]	k_{mod}	0,8	-
Modificatie factor [21]	k_{def}	0,7	-
Factor systeem werking [21]	k_{sys}	1,1	-
Materiaal factor [31]	γ_M	1,3	-

doorsnede (Vergelijking (A.5)), dat kleiner moet zijn dan de buigsterkte van het hout. De spanning is per longitudinale houtlaag berekend en is in twee delen gesplitst. Deze twee delen zijn in formulevorm weergegeven in Vergelijking (A.6). Het eerste deel berekent de spanning in het midden van iedere longitudinale houtlaag. De γ -factor is in rekening gebracht als gevolg van rol-afschuifspanning, dat initieel bij de Euler-Bernoulli theorie wordt verwaarloosd. Het tweede deel berekent per longitudinale laag de spanning in de uiterste vezel. De sommatie van deze twee componenten resulteert in het spanningsverloop van de totale doorsnede.

$$\sigma_{m,d} = \max\{|\sigma_{i,c/t} \pm \sigma_{i,m}|\} \leq f_{m,d} = k_{\text{sys}} \cdot k_{\text{mod}} \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} \quad (\text{A.5})$$

Met:

$\sigma_{m,d}$ – is de rekenwaarde van de optredende spanning op basis van buiging;

$\sigma_{i,c/t}$ – axiale druk(c)- of trekspanning(t) per longitudinale houtlaag i ;

$\sigma_{i,m}$ – spanning per longitudinale houtlaag i op basis van buiging;

$f_{m,d}$ – rekenwaarde voor de toelaatbare houtspanning op basis van buiging;

$$\sigma_{i,c/t} = \frac{M_{ed}}{EI_{eff}} \gamma_i E a_i \quad \sigma_{i,m} = \frac{M_{ed}}{EI_{eff}} \frac{E_i h_i}{2} \quad (\text{A.6})$$

Met:

M_{ed} – rekenwaarde van het optredende buigende moment;

EI_{eff} – effectieve buigstijfheid van de totale doorsnede;

γ_i – gamma-factor per longitudinale houtlaag i ;

E_i – elasticiteitsmodulus per longitudinale houtlaag i ;

a_i – afstand van het zwaartepunt per longitudinale houtlaag i tot het zwaartepunt van de totale doorsnede;

h_i – laagdikte per longitudinale houtlaag i .

De UGT-toets voor de wanden is gebaseerd op een combinatie van buigspanning en axiale spanning, zoals weergegeven in Vergelijking (A.7).

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \frac{N_{ed}}{k_c \cdot A_{\text{net}} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (\text{A.7})$$

Met:

$\sigma_{c,0,d}$ – rekenwaarde van de optredende axiale spanning in longitudinale richting;

k_c – knik-factor;

$f_{c,0,d}$ – rekenwaarde voor de toelaatbare axiale houtspanning in longitudinale richting;

N_{ed} – rekenwaarde van de optredende axiale kracht;

A_{net} – netto oppervlak van de doorsnede; op basis van de longitudinale lagen.

knikfactor:

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{\text{rel}}^2}} \quad (\text{A.8})$$

$$\lambda = \frac{\ell_{k,i}}{\sqrt{\frac{I_{0,eff}}{A_{0,net}}}} \quad (\text{A.9})$$

$$\lambda_{\text{rel}} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (\text{A.10})$$

$$k = \frac{1}{2} \left[(1 + \beta_c (\lambda_{\text{rel}} - 0,3) + \lambda_{\text{rel}}^2) \right] \quad (\text{A.11})$$

Met:

λ – slankheid van de ligger;

λ_{rel} – irelatieve slankheid voor laterale knik;

β_c – imperfectie factor voor CLT = 0,1;

k – empirische formule voor bepalen knikfactor.

A.2.1. Dimensie CLT vloer 160 mm

Voor de vloeren is een 5-laagse CLT plaat aangenomen met een totale dikte van 160 mm. Iedere longitudinale laag is 40 mm, de twee transversale houtlagen zijn ieder 20 mm dik. De vloer overspanning bedraagt 5,4 m.

Optredende belastingen

Tabel A.3: Optredende belasting CLT-vloer 160mm

Belasting UGT	E_d	5,01	kN/m
Belasting BGT	E_k	3,735	kN/m
Belasting BGT _{QP}	E_{QP}	2,51	kN/m

Controle UGT

Vanwege symmetrie is alleen de γ_1 -factor voor de buitenste laag berekend. De γ_2 -factor voor de middelste is gelijk aan 1,0.

$$\gamma_1 = \gamma_3 = \frac{1}{\left(1 + \frac{\pi^2 \cdot E_{0,gem} \cdot A_1}{I_{ref}^2} \cdot \frac{d_{1,2}}{b \cdot G_{R,12}}\right)} = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot 11000 \cdot 1000 \cdot 40}{5400^2} \cdot \frac{20}{1000 \cdot 50}} = 0,944 \quad (\text{A.12})$$

$$\gamma_2 = 1,0 \quad (\text{A.13})$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_{0,gem} \cdot b \cdot d_1 \cdot \left(\frac{d_1}{2} + d_{1,2} + \frac{d_2}{2}\right) - \gamma_3 \cdot E_{0,gem} \cdot b \cdot d_3 \cdot \left(\frac{d_2}{2} + d_{2,3} + \frac{d_3}{2}\right)}{\sum_{i=1}^3 \gamma_i \cdot E_{0,gem} \cdot b \cdot d_i} \quad (\text{A.14})$$

$$a_2 = \frac{11000 \cdot 1000 \left(0,944 \cdot 40 \cdot \left(\frac{40}{2} + 20 + \frac{40}{2}\right) - 0,944 \cdot 40 \cdot \left(\frac{40}{2} + 20 + \frac{40}{2}\right)\right)}{11000 \cdot (2 \cdot 0,944 \cdot 1000 \cdot 40 + 1 \cdot 1000 \cdot 40)} = 0 \text{ mm} \quad (\text{A.15})$$

$$a_1 = -\left(\frac{d_1}{2} + d_{1,2} + \frac{d_2}{2}\right) - a_2 = -\left(\frac{40}{2} + 20 + \frac{40}{2}\right) - 0 = -60 \text{ mm} \quad (\text{A.16})$$

$$a_3 = \left(\frac{d_2}{2} + d_{2,3} + \frac{d_3}{2}\right) + a_2 = \left(\frac{40}{2} + 20 + \frac{40}{2}\right) + 0 = 60 \text{ mm} \quad (\text{A.17})$$

$$I_{0,eff} = \sum_{i=1}^N \frac{E_i}{E_{ref}} \cdot \frac{b \cdot d_i^3}{12} + \sum_{i=1}^N \gamma_i \cdot \frac{E_i}{E_{ref}} \cdot b \cdot d_i \cdot a_i^2 \quad (\text{A.18})$$

$$I_{0,eff} = 1 \cdot 1000 \left(3 \frac{40^3}{12} + 2 \cdot 0,944 \cdot 40 \cdot 60^2 + 1,0 \cdot 40 \cdot 0^2\right) = 2,878 \cdot 10^8 \text{ mm}^4 \quad (\text{A.19})$$

$$EI_{0,eff} = \sum_{i=1}^N E_i \cdot \frac{b \cdot d_i^3}{12} + \sum_{i=1}^N \gamma_i \cdot E_i \cdot b \cdot d_i \cdot a_i^2 = I_{0,eff} \cdot E_i = 3,166 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}^2 \quad (\text{A.20})$$

$$d_{0,eff} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot I_{0,eff}}{b}} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot 2,878 \cdot 10^8}{1000}} = 151,2 \text{ mm} \quad (\text{A.21})$$

$$\sigma_{m,d} = \sigma_{i,c/t} + \sigma_{i,m} = \frac{5,01 \cdot 5,4^2 \cdot 10^6}{8 \cdot 3,166 \cdot 10^{12}} \cdot 0,944 \cdot 11000 \cdot 60 + \frac{5,01 \cdot 5,4^2 \cdot 10^6}{8 \cdot 3,166 \cdot 10^{12}} \frac{11000 \cdot 40}{2} \quad (\text{A.22})$$

$$\sigma_{m,d} = 3,59 + 1,27 = 4,86 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{A.23})$$

$$\sigma_{m,d} = 4,86 \leq f_{m,d} = 1,1 \cdot 0,8 \frac{24}{1,3} = 16,2 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{A.24})$$

$$u.c. = \frac{4,86}{16,2} = 0,3 \quad (\text{A.25})$$

Controle BGT

De zakking op basis van de Gamma-methode is berekend middels de effectieve buigstijfheid. Als gevolg is de Euler-Bernoulli theorie toegepast op het berekenen van de zakking.

$$w = \frac{5 \cdot qL^4}{384 \cdot EI_{eff}} \quad (\text{A.26})$$

Quasi-permanente ontwerp situatie:

$$w_{qs} = \frac{5 \cdot 5400^4}{384 \cdot EI_{\text{eff}}} (G_{k,1} + G_{k,2} + \psi_2 Q_{k,2}) (1 + k_{\text{def}}) \leq \frac{l}{250} \quad (\text{A.27})$$

$$w_{qs} = \frac{5 \cdot (0,72 + 1,265 + 0,3 \cdot 1,75) 5400^4}{384 \cdot 3,166 \cdot 10^{12}} (1 + 0,7) = 14,9 \leq 21,6 \quad (\text{A.28})$$

$$u.c. = \frac{14,9}{21,6} = 0,69 \quad (\text{A.29})$$

$$w_{qs} = w_{\text{inst,qs}} \cdot (1 + k_{\text{def}}) \leq \frac{\ell}{250} \quad (\text{A.30})$$

$$w_{\text{inst,qs}} = w_G \oplus \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot w_{q,i} \quad (\text{A.31})$$

Initiele situatie:

$$w_{in} = \frac{5 \cdot L^4}{384 \cdot EI_{\text{eff}}} (G_{k,1} + G_{k,2} + Q_{k,2}) \leq \frac{l}{450} \quad (\text{A.32})$$

$$w_{in} = \frac{5 \cdot (0,72 + 1,265 + 1,75) 5400^4}{384 \cdot 3,166 \cdot 10^{12}} = 13,06 \leq 13,5 \quad (\text{A.33})$$

$$u.c. = \frac{13,06}{13,5} = 0,97 \quad (\text{A.34})$$

Eind situatie:

$$w_{eind} = \frac{5 \cdot L^4}{384 \cdot EI_{\text{eff}}} ((G_{k,1} + G_{k,2} + Q_{k,2}) + (G_{k,1} + G_{k,2} + \psi_2 Q_{k,2}) k_{\text{def}}) \leq \frac{\ell}{150} \quad (\text{A.35})$$

$$w_{eind} = \frac{5 \cdot 5400^4}{384 \cdot EI_{\text{eff}}} ((0,72 + 1,265 + 1,75) + (0,72 + 1,265 + 0,3 \cdot 1,75) 0,7) = 19,2 \leq 36 \quad (\text{A.36})$$

$$u.c. = \frac{19,2}{36} = 0,53 \quad (\text{A.37})$$

A.2.2. Dimensie CLT wand 60 mm

Voor de buitenwand is een 3-laagse CLT plaat aangenomen met een totale dikte van 60 mm. Iedere houtlaag is 20 mm dik. De wand overspanning bedraagt 3,0 m.

Optredende belastingen

Tabel A.4: Optredende belasting CLT-wand 60 mm

Belasting UGT	E_d	57,97	kN
Belasting BGT	E_k	41,01	kN
Belasting UGT _{wind}	E_d	2,35	kNm/m
Belasting BGT _{wind}	E_k	1,57	kNm/m

Controle UGT

Vanwege symmetrie is alleen de γ_1 -factor voor de buitenste laag berekend.

$$\gamma_1 = \frac{1}{\left(1 + \frac{\pi^2 \cdot E_{0,gem} \cdot A_1}{\ell_{ref}^2} \cdot \frac{d_{1,2}}{b \cdot G_{R,12}}\right)} = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot 11000 \cdot 1000 \cdot 20}{3000^2} \frac{20}{1000 \cdot 50}} = 0,912 \quad (\text{A.38})$$

$$\gamma_2 = \gamma_1 \quad (\text{A.39})$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_{0,gem} \cdot b \cdot d_1 \cdot \left(\frac{d_1}{2} + \frac{d_2}{2}\right)}{\sum_{i=1}^2 \gamma_i \cdot E_{0,gem} \cdot b \cdot d_i} \quad (\text{A.40})$$

$$a_2 = \frac{11000 \cdot 1000 \cdot 0,912 \cdot 20 \cdot \left(\frac{20}{2} + \frac{20}{2}\right)}{11000 \cdot 2 \cdot 0,912 \cdot 1000 \cdot 20} = 20 \text{ mm} \quad (\text{A.41})$$

$$a_1 = -\left(\frac{d_1}{2} + \frac{d_2}{2}\right) - a_2 = -\left(\frac{20}{2} + \frac{20}{2}\right) - 0 = -20 \text{ mm} \quad (\text{A.42})$$

$$I_{0,eff} = \sum_{i=1}^2 \frac{E_i}{E_{ref}} \cdot \frac{b \cdot d_i^3}{12} + \sum_{i=1}^2 \gamma_i \cdot \frac{E_i}{E_{ref}} \cdot b \cdot d_i \cdot a_i^2 \quad (\text{A.43})$$

$$I_{0,eff} = 1 \cdot 1000 \left(2 \frac{20^3}{12} + 2 \cdot 0,912 \cdot 20 \cdot 20^2\right) = 1,593 \cdot 10^7 \text{ mm}^4 \quad (\text{A.44})$$

$$EI_{0,eff} = \sum_{i=1}^2 E_i \cdot \frac{b \cdot d_i^3}{12} + \sum_{i=1}^2 \gamma_i \cdot E_i \cdot b \cdot d_i \cdot a_i^2 = I_{0,ef} \cdot E_i = 1,752 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2 \quad (\text{A.45})$$

$$d_{0,eff} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot I_{0,eff}}{b}} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot 1,593 \cdot 10^7}{1000}} = 57,6 \text{ mm} \quad (\text{A.46})$$

$$\sigma_{m,d} = \sigma_{i,c/t} + \sigma_{i,m} = \frac{2,352 \cdot 3,0^2 \cdot 10^6}{8 \cdot 1,752 \cdot 10^{11}} 0,912 \cdot 11000 \cdot 20 + \frac{2,352 \cdot 3,0^2 \cdot 10^6}{8 \cdot 1,752 \cdot 10^{11}} \frac{11000 \cdot 20}{2} \quad (\text{A.47})$$

$$\sigma_{m,d} = 3,03 + 1,66 = 4,69 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{A.48})$$

Bepalen van de knikfactor:

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} = \frac{1}{3,23 + \sqrt{3,23^2 - 2,29^2}} = 0,182 \quad (\text{A.49})$$

$$\lambda = \frac{\ell_{k,i}}{\sqrt{\frac{I_{0,eff}}{A_{0,net}}}} = \frac{3000}{\sqrt{\frac{1,593 \cdot 10^7}{1000 \cdot 40}}} = 150,35 \quad (\text{A.50})$$

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{150,35}{\pi} \sqrt{\frac{21}{9160}} = 2,29 \quad (\text{A.51})$$

$$k = \frac{1}{2} \left[(1 + \beta_c (\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2) \right] = \frac{1}{2} \left[(1 + 0,1 (2,29 - 0,3) + 2,29^2) \right] = 3,23 \quad (\text{A.52})$$

$$u.c. = \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \frac{\frac{N_{ed}}{A_{net}}}{k_c \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \frac{\frac{57,97 \cdot 10^3}{1000 \cdot 40}}{0,182 \cdot \frac{21 \cdot 0,8}{1,3}} + \frac{4,69}{16,2} = 0,90 \leq 1 \quad (\text{A.53})$$

A.2.3. Dimensie CLT wand 80 mm

Voor de binnenwand is een 3-laagse CLT-plaat aangenomen met een totale dikte van 80 mm. Iedere longitudinale houtlaag is 30 mm dik. De middelste transversale houtlaag heeft een dikte van 20 mm. De wand overspanning bedraagt 3,0 m.

Optredende belastingen

Tabel A.5: Optredende belasting CLT-wand 80 mm

Belasting UGT	E_d	140,37	kN
Belasting BGT	E_k	105,17	kN

Controle UGT

Vanwege symmetrie is alleen de γ_1 -factor voor de buitenste laag berekend.

$$\gamma_1 = \frac{1}{\left(1 + \frac{\pi^2 \cdot E_{0,gem} \cdot A_1}{l_{ref}^2} \cdot \frac{d_{1,2}}{b \cdot G_{R,12}}\right)} = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot 11000 \cdot 1000 \cdot 30}{3000^2} \cdot \frac{20}{1000 \cdot 50}} = 0,874 \quad (\text{A.54})$$

$$\gamma_2 = \gamma_1 \quad (\text{A.55})$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 \cdot E_{0,gem} \cdot b \cdot d_1 \cdot \left(\frac{d_1}{2} + \frac{d_2}{2}\right)}{\sum_{i=1}^2 \gamma_i \cdot E_{0,gem} \cdot b \cdot d_i} \quad (\text{A.56})$$

$$a_2 = \frac{0,874 \cdot 1000 \cdot 11000 \cdot 30 \cdot \left(\frac{30}{2} + \frac{30}{2}\right)}{0,874 \cdot 11000 \cdot 2 \cdot 1000 \cdot 20} = 25 \text{ mm} \quad (\text{A.57})$$

$$a_1 = -\left(\frac{d_1}{2} + \frac{d_2}{2}\right) - a_2 = -\left(\frac{30}{2} + \frac{30}{2}\right) - 0 = -25 \text{ mm} \quad (\text{A.58})$$

$$I_{0,eff} = \sum_{i=1}^2 \frac{E_i}{E_{ref}} \cdot \frac{b \cdot d_i^3}{12} + \sum_{i=1}^2 \gamma_i \cdot \frac{E_i}{E_{ref}} \cdot b \cdot d_i \cdot a_i^2 \quad (\text{A.59})$$

$$I_{0,eff} = 1 \cdot 1000 \left(2 \frac{30^3}{12} + 2 \cdot 0,874 \cdot 30 \cdot 25^2\right) = 3,726 \cdot 10^7 \text{ mm}^4 \quad (\text{A.60})$$

$$EI_{0,eff} = \sum_{i=1}^2 E_i \cdot \frac{b \cdot d_i^3}{12} + \sum_{i=1}^2 \gamma_i \cdot E_i \cdot b \cdot d_i \cdot a_i^2 = I_{0,eff} \cdot E_i = 4,098 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2 \quad (\text{A.61})$$

$$d_{0,eff} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot I_{0,eff}}{b}} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot 3,726 \cdot 10^7}{1000}} = 76,47 \text{ mm} \quad (\text{A.62})$$

$$\sigma_{m,d} = \sigma_{i,c/t} + \sigma_{i,m} = 0 \quad (\text{A.63})$$

Bepalen van de knikfactor:

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{\text{rel}}^2}} = \frac{1}{2,26 + \sqrt{2,26^2 - 1,83^2}} = 0,279 \quad (\text{A.64})$$

$$\lambda = \frac{\ell_{k,i}}{\sqrt{\frac{I_{0,eff}}{A_{0,net}}}} = \frac{3000}{\sqrt{\frac{3,726 \cdot 10^7}{1000 \cdot 60}}} = 120,39 \quad (\text{A.65})$$

$$\lambda_{\text{rel}} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{120,39}{\pi} \sqrt{\frac{21}{9160}} = 1,83 \quad (\text{A.66})$$

$$k = \frac{1}{2} [(1 + \beta_c (\lambda_{\text{rel}} - 0,3) + \lambda_{\text{rel}}^2)] = \frac{1}{2} [(1 + 0,1 (1,83 - 0,3) + 1,83^2)] = 2,26 \quad (\text{A.67})$$

$$u.c. = \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \frac{\frac{N_{ed}}{A_{net}}}{k_c \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = \frac{\frac{140,37 \cdot 10^3}{1000 \cdot 60}}{0,279 \cdot \frac{21 \cdot 0,8}{1,3}} + 0 = 0,65 \leq 1 \quad (\text{A.68})$$

A.3. Berekening betonnen elementen

A.3.1. Controle betonvloer dikte 210 mm

Rekenmodel.....: 2e-orde niet lineair elastisch.
 Theorieën voor de bepaling van de krachtsverdeling:

- 1) Uiterste grenstoestand:
 - Geometrisch niet lineair alle staven.
 - Fysisch niet lineair alle staven.
- 2) Gebruiksgrenstoestand:
 - Geometrisch lineair alle staven.
 - Fysisch niet lineair alle staven.

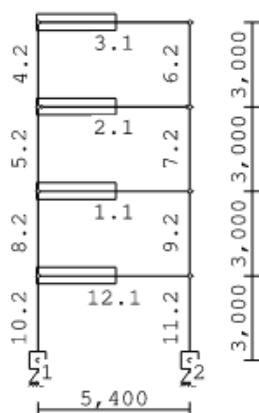
Convergentie coefficient.....: 2.0 Maximum aantal iteraties.....: 50
 Max.deellengte kolommen/wanden: 0.500 Max.deellengte balken/vloeren: 0.500
 Max. X-verplaatsing in UGT....: 0.500 Max. Z-verplaatsing in UGT...: 0.250

Gunstige werking van de permanente belasting wordt automatisch verwerkt.

Toegepaste normen volgens Eurocode met Nederlandse NB

Belastingen	NEN-EN 1990:2002	C2:2010, A1:2019	NB:2019 (nl)
	NEN-EN 1991-1-1:2002	C1/C11:2019	NB:2019 (nl)
Beton	NEN-EN 1992-1-1:2011 (nl)	C2/A1:2015 (nl)	NB:2016 (nl)

GEOMETRIE



MATERIALEN

Mt	Kwaliteit	E-modulus [N/mm ²]	S.G.	Pois.	Uitz. coëff
1	C30/37	9465	25.0	0.20	1.0000e-05

MATERIALEN vervolg

Mt	Kwaliteit	Cement	Kruipfac.	Toeslag	Rho[kg/m3]
1	C30/37	N	2.47	Normaal	2400

PROFIELEN [mm]

Prof.	Omschrijving	Materiaal	Oppervlak	Traagheid	Vormf.
1	Beton	1:C30/37	2.1000e+05	7.7175e+08	0.00
2	Beton	1:C30/37	1.0000e+05	8.3333e+07	0.00

PROFIELEN vervolg [mm]

Prof.	Staaftype	Breedte	Hoogte	e	Type	b1	h1	b2	h2
1	0:Normaal	1000	210	105.0	0:RH				
2	0:Normaal	1000	100	50.0	0:RH				

PROFIELVORMEN [mm]

1 Beton



2 Beton

**KNOPEN**

Knoop	X	Z	Knoop	X	Z
1	0.000	0.000	6	5.400	6.000
2	5.400	0.000	7	0.000	9.000
3	0.000	3.000	8	5.400	9.000
4	5.400	3.000	9	0.000	12.000
5	0.000	6.000	10	5.400	12.000

STAVEN

St.	ki	kj	Profiel	Aansl.i	Aansl.j	Lengte	Opm.
1	5	6	1:Betón	NDM	NDM	5.400	
2	7	8	1:Betón	ND	ND	5.400	
3	9	10	1:Betón	NDM	NDM	5.400	
4	9	7	2:Betón	NDM	NDM	3.000	
5	7	5	2:Betón	NDM	NDM	3.000	
6	10	8	2:Betón	NDM	NDM	3.000	
7	8	6	2:Betón	NDM	NDM	3.000	
8	5	3	2:Betón	NDM	NDM	3.000	
9	6	4	2:Betón	NDM	NDM	3.000	
10	3	1	2:Betón	NDM	NDM	3.000	
11	4	2	2:Betón	NDM	NDM	3.000	
12	3	4	1:Betón	NDM	NDM	5.400	

VASTE STEUNPUNTEN

Nr. knoop	Kode	XZR	l=vast	0=vrij	Hoek
1	1	111			0.00
2	2	111			0.00

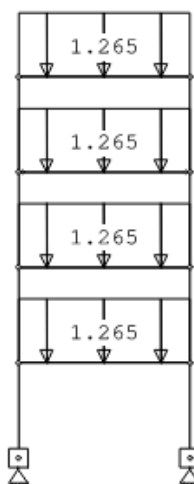
BELASTINGGEVALLEN

B.G.	Omschrijving	EGZ	Type
1	Permanente belasting	-1.00	1
2	Veranderlijke belasting		2 Ver. bel. pers. ed. (q _k)

BELASTINGEN

B.G:1 Permanente belasting

Eigen gewicht van alle staven is meegenomen in berekening. Richting:↓

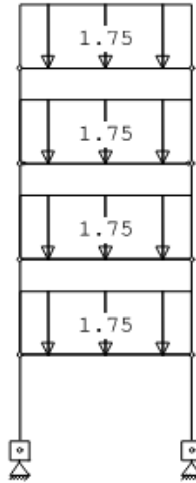
**STAAFBELASTINGEN**

B.G:1 Permanente belasting

StAAF	Type	q1/p/m	q2	A	B	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
1	1:QZLokaal	-1.26	-1.26	0.000	0.000			
2	1:QZLokaal	-1.26	-1.26	0.000	0.000			
3	1:QZLokaal	-1.26	-1.26	0.000	0.000			
12	1:QZLokaal	-1.26	-1.26	0.000	0.000			

BELASTINGEN

B.G:2 Veranderlijke belasting

**KNOOPBELASTINGEN**

B.G:2 Veranderlijke belasting

Last	Knoop	Richting	waarde	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
1	3	Z	0.000	1.00	1.00	1.00
2	4	Z	0.000	1.00	1.00	1.00
3	5	Z	0.000	1.00	1.00	1.00
4	6	Z	0.000	1.00	1.00	1.00
5	7	Z	0.000	1.00	1.00	1.00
6	8	Z	0.000	1.00	1.00	1.00
7	1	Z	0.000	1.00	1.00	1.00
8	2	Z	0.000	1.00	1.00	1.00

STAAFBELASTINGEN

B.G:2 Veranderlijke belasting

StAAF	Type	q1/p/m	q2	A	B	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
1	1:QZLokaal	-1.75	-1.75	0.000	0.000	1.00	1.00	1.00
2	1:QZLokaal	-1.75	-1.75	0.000	0.000	1.00	1.00	1.00
12	1:QZLokaal	-1.75	-1.75	0.000	0.000	1.00	1.00	1.00
3	1:QZLokaal	-1.75	-1.75	0.000	0.000	1.00	1.00	1.00

BEREKENINGSTATUS

Controlerende berekening

B.C. Iteratie Status

- | | | |
|---|----|------------------------|
| 1 | 12 | Nauwkeurigheid bereikt |
| 2 | 1 | Lineaire berekening |

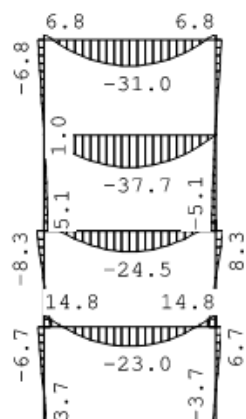
BELASTINGCOMBINATIES

BC	Type				
1	Fund.	1.20	$G_{k,1}$	+	1.50 $Q_{k,2}$
2	Kar.	1.00	$G_{k,1}$	+	1.00 $Q_{k,2}$

BELASTINGCOMBINATIE**B.C:1 Sterkte****MOMENTEN**

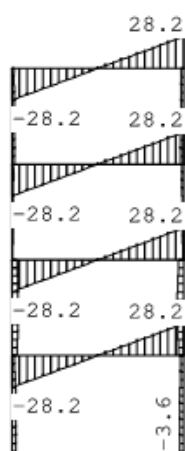
2e orde

B.C:1 Sterkte

**DWARSKRACHTEN**

2e orde

B.C:1 Sterkte

**REACTIES**

2e orde

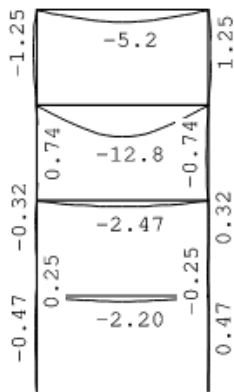
B.C:1 Sterkte

Kn.	X	Z	M
1	3.47	148.78	3.70
2	-3.47	148.78	-3.70
	0.00	297.56	: Som van de reacties
	0.00	-297.56	: Som van de belastingen

BELASTINGCOMBINATIE**B.C:2 Karakteristiek****VERPLAATSINGEN**

Geom.LE;Fys.NLE.kort [mm]

B.C:2 Karakteristiek



N.B. In deze verplaatsingen is de kruipvervorming (w_2) niet verwerkt!

REACTIES

Geom.LE;Fys.NLE.kort

B.C:2 Karakteristiek

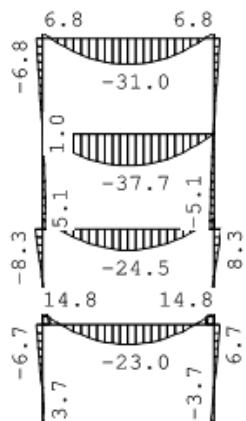
Kn.	X	Z	M
1	1.98	119.26	2.00
2	-1.98	119.26	-2.00
	0.00	238.52	: Som van de reacties
	0.00	-238.52	: Som van de belastingen

OMHULLENDE VAN DE FUNDAMENTELE COMBINATIES

MOMENTEN

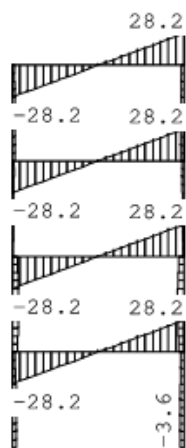
2e orde

Fundamentele combinatie

**DWARSKRACHTEN**

2e orde

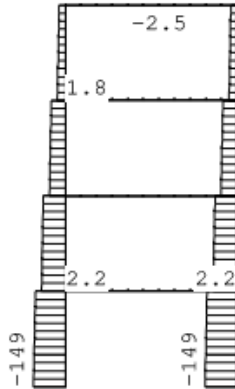
Fundamentele combinatie



NORMAALKRACHTEN

2e orde

Fundamentele combinatie

**REACTIES**

2e orde

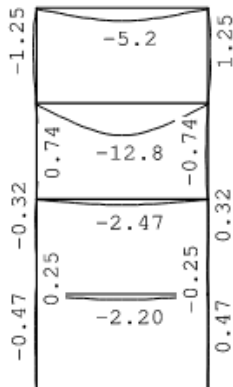
Fundamentele combinatie

Kn.	X	Z	M
1	3.47	148.78	3.70
2	-3.47	148.78	-3.70

OMHULLENDE VAN DE KARAKTERISTIEKE COMBINATIES**VERPLAATSINGEN**

Geom.LE;Fys.NLE.kort [mm]

Karakteristieke combinatie



N.B. In deze verplaatsingen is de kruipvervorming (w_2) niet verwerkt!

REACTIES

Geom.LE;Fys.NLE.kort

Karakteristieke combinatie

Kn.	X	Z	M
1	1.98	119.26	2.00
2	-1.98	119.26	-2.00

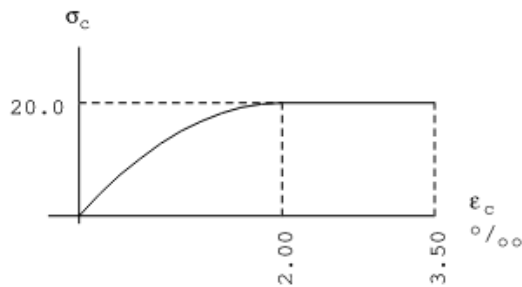
MATERIAALGEGEVENS [N] [mm]

t.b.v. materiaal:1 C30/37

Spanning-rek diagrammen

T.b.v sterkte

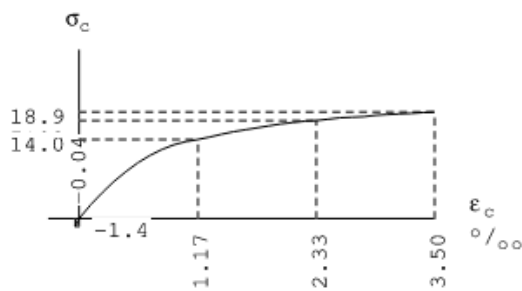
E-modulus: 11429



Spanning-rek diagrammen

T.b.v stijfheid in grenstoestand

E-modulus: 7886

**PROFIELGEGEVENS Vloer****[N] [mm]**

1: Beton

Algemeen

Materiaal	: C30/37	Staaflengte:	5400
Oppervlak	: 2.100000e+05	Traagheid	: 7.7175e+08
Staaftype	: 0: normaal	Vormfactor	: 0.00

Doorsnede

breedte	: 1000	hoogte	: 210	zwaartepunt tov negatieve zijde	: 105
---------	--------	--------	-------	---------------------------------	-------

Betonkwaliteit	: C30/37	Kruipcoëf.	: 2.47
Soort spanningsrekdiagram	: Parabolisch - rechthoekig diagram		
Treksterkte $f_{ct,eff}$ art. 7.1(2)	: f_{ctm} (2.90 N/mm ²)		
Doorbuiging volgens art.7.3.4(3)	: Ja		
Langeduur scheurmoment begrensd	: Ja		
Staalkwaliteit hoofdwapening	: 500	ϵ_{uk}	: 2.50
Soort spanningsrekdiagram	: Bi-lineair diagram met klimmende tak		
Bundels toepassen	: Nee		
Controle gebruikseisen	: Ja		

Betondekking	Positieve zijde	Negatieve zijde
Milieu :	XC1	XC1
Gestort tegen bestaand beton :	Nee	Nee
Element met plaatgeometrie :	Ja	Ja
Specifieke kwaliteitsbeheersing :	Nee	Nee
Oneffen beton oppervlak :	Nee	Nee
Ondergrond :	Glad / N.v.t.	Glad / N.v.t.
Constructieklasse :	S2	S2
Grootste korrel :	31.5	
Hoofdwapening :	1ste laag	1ste laag
Nominale dekking :	15	15
Toegepaste dekking :	15	15
Gelijkwaardige diameter :	10	10
$C_{min,b}$ $C_{min,dur}$ ΔC_{dur} :	10 10 0	10 10 0
C_{min} ΔC_{dev} C_{nom} :	10 5 15	10 5 15
Beugel / Verdeelwapening :	2de laag	2de laag
Nominale dekking :	15	15
Toegepaste dekking :	25	25
Gelijkwaardige diameter :	6	6
$C_{min,b}$ $C_{min,dur}$ ΔC_{dur} :	6 10 0	6 10 0
C_{min} ΔC_{dev} C_{nom} :	10 5 15	10 5 15
Wapening		
Basiswapening :	10-150	10-150
Diameter nuttige hoogte :	10.0	10.0
Hoofdwapening laag :	1	1
Diameter verdeelwapening :	6.0	6.0
Min.tussenruimte :	50	50
Art. 7.3.2 minimum wapening :	Ja	Ja
Aanhechting volgens art. 8.4.2 :	Goed	Goed

PROFIELGEGEVENS Vloer**[N] [mm]**

2: Beton

Algemeen

Materiaal :	C30/37	Staaflengte:	3000
Oppervlak :	9.999999e+04	Traagheid :	8.3333e+07
Staaftype :	0: normaal	Vormfactor :	0.00

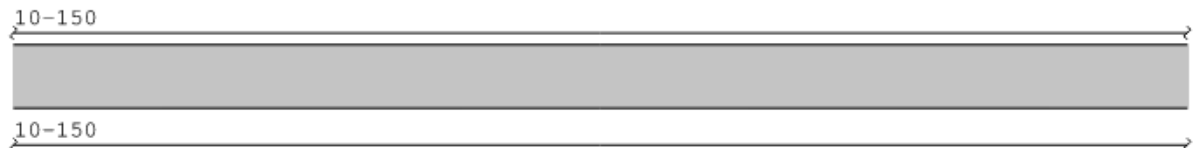
Doorsnede

breedte :	1000	hoogte :	100	zwaartepunt tov negatieve zijde :	50
Betonkwaliteit :	C30/37	Kruipcoëf. :	2.47		
Soort spanningsrekdiagram :	Parabolisch - rechthoekig diagram				
Treksterkte $f_{ct,eff}$ art. 7.1(2) :	f_{ctm} (2.90 N/mm ²)				
Doorbuiging volgens art.7.3.4(3) :	Ja				
Langeduur scheurmoment begrensd :	Ja				
Staalkwaliteit hoofdwapening :	500	ϵ_{uk} :	2.50		
Soort spanningsrekdiagram :	Bi-lineair diagram met klimmende tak				
Bundels toepassen :	Nee				
Controle gebruikseisen :	Ja				

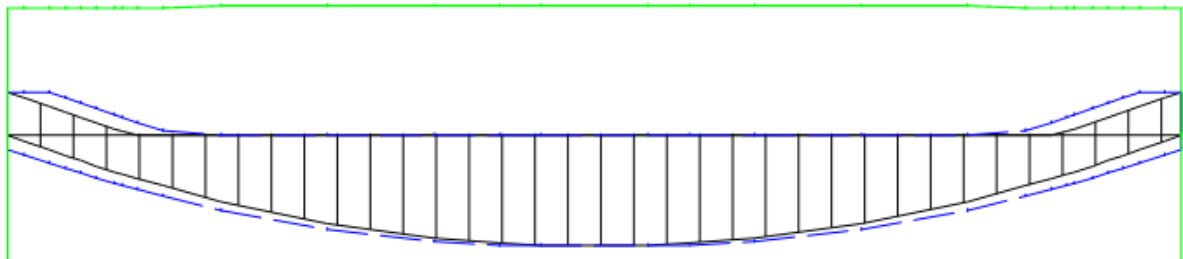
Betondekking	Positieve zijde	Negatieve zijde
Milieu :	XC1	XC1
Gestort tegen bestaand beton :	Nee	Nee
Element met plaatgeometrie :	Ja	Ja
Specifieke kwaliteitsbeheersing :	Nee	Nee
Oeffen beton oppervlak :	Nee	Nee
Ondergrond :	Glad / N.v.t.	Glad / N.v.t.
Constructieklasse :	S2	S2
Grootste korrel :	31.5	
Hoofdwapening :	1ste laag	1ste laag
Nominale dekking :	15	15
Toegepaste dekking :	15	15
Gelijkwaardige diameter :	8	8
$C_{min,b}$ $C_{min,dur}$ ΔC_{dur} :	8 10 0	8 10 0
C_{min} ΔC_{dev} C_{nom} :	10 5 15	10 5 15
Beugel / Verdeelwapening :	2de laag	2de laag
Nominale dekking :	15	15
Toegepaste dekking :	23	23
Gelijkwaardige diameter :	6	6
$C_{min,b}$ $C_{min,dur}$ ΔC_{dur} :	6 10 0	6 10 0
C_{min} ΔC_{dev} C_{nom} :	10 5 15	10 5 15
Wapening		
Basiswapening :	8-150	8-150
Diameter nuttige hoogte :	8.0	8.0
Hoofdwapening laag :	1	1
Diameter verdeelwapening :	6.0	6.0
Min.tussenruimte :	50	50
Art. 7.3.2 minimum wapening :	Ja	Ja
Aanhechting volgens art. 8.4.2 :	Goed	Goed

HOOFDWAPENING [mm²]

Profiel:1 B*H 1000*210

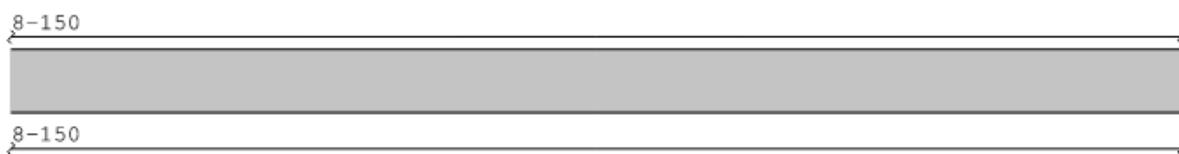
**MED DEKKINGSLIJN**

Profiel:1 B*H 1000*210



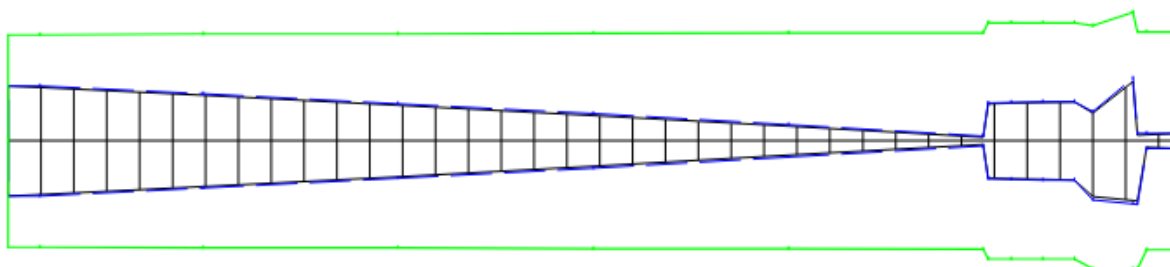
HOOFDWAPENING [mm²]

Profiel:2 B*H 1000*100



MED DEKKINGSLIJN

Profiel:2 B*H 1000*100



HOOFDWAPENING

Prf.	Pos [mm]	Benodigd		Aanwezig		N _{Ed} [kN]	M _{Ed} [kNm]	M _{Rd} [kNm]	Opm.
		Apos [mm ²]	Aneg [mm ²]	Apos [mm ²]	Aneg [mm ²]				
1	0	246	0	524	524	2	14.76	43.63	54
1	2945	0	453	524	524	1	-37.69	-43.70	
2	0	155	0	335	335	-28	6.85	13.26	
2	0	0	155	335	335	-28	-6.85	-13.26	

Opmerkingen

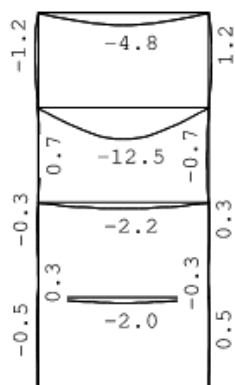
[54] * = Eisen met betrekking tot minimum wapening ten behoeve van gecontroleerde scheurvorming zijn toegepast volgens art. 7.3.2.

REKKEN EN SPANNINGEN

Prf.	Pos. [mm]	N _{Ed} [kN]	M _{Ed} [kNm]	x [mm]	ε _b [%]	ε _o [%]	σ _b [N/mm ²]	σ _o [N/mm ²]	ε _{sb} [%]	ε _{so} [%]	σ _{sb} [N/mm ²]	σ _{so} [N/mm ²]	Opm
1	0	2	14.8	38	0.92	-0.20	0.0	-3.8	0.8	-0.1	161.9	-18.7	
1	2945	1	-37.7	39	-0.53	2.32	-9.2	0.0	-0.3	2.1	-51.2	410.6	
2	0	-28	6.8	23	1.55	-0.47	0.0	-8.3	1.2	-0.1	233.7	-17.2	
2	0	-28	-6.8	23	-0.47	1.55	-8.3	0.0	-0.1	1.2	-17.2	233.7	

VERVORMINGEN w_{max}

Karakteristieke combinatie

**DOORBUIGINGEN**

Karakteristieke combinatie

Nr.	staven	Zijde	positie	l_{rep}	w_1	w_2	-- w_{bij} --	w_{tot}	w_c	-- w_{max} --
			[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm] [lrep/]	[mm]	[mm]	[mm] [lrep/]
1	1	Neg.	2.945	5400			-2.2 2480	-2.2		-2.2 2480
2	2	Neg.	2.945	5400			-12.5 433	-12.5		-12.5 433
3	3	Neg.	2.945	5400			-4.8 1127	-4.8		-4.8 1127
12	12	Neg.	2.945	5400			-2.0 2652	-2.0		-2.0 2652

De waarden voor w_1 zijn niet berekend, omdat een blijvende combinatie ontbreekt

De waarden voor w_2 zijn niet berekend, omdat een quasi-blijvende combinatie ontbreekt

A.3.2. Controle betonnen tussenwand dikte 100 mm

Geometrie

Type constructie	:	Wand
Wandbreedte	[mm] :	1000
Wanddikte in buigingsricht.	[mm] :	100
Wandhoogte (L)	[mm] :	3000
Belastingschema	:	Geschoord
Kniklengtefactor X	:	1.00
Krommingsverdeling factor c X	:	10.00

**Belasting**

	BG1	BG2	BG3	Maatgevend BC
Omschrijving belastinggeval	Perm	Ver		
Normaalkracht N Ek	[kN] : 194.25	47.25	0.00	311.85
MEk,X boven	[kNm] : 0.00	0.00	0.00	0.00
MEk,X onder	[kNm] : 0.00	0.00	0.00	0.00
Belastingfactoren				
BC1 vgl10b	Fundamenteel : 1.20	1.50	1.50	
BC2 vgl10a	Fundamenteel : 1.35	1.05	1.05	Maatgevend X

Beton en Wapening

Betonkwaliteit	:	C30/37	Prefab	:	Nee
Soort spanningsrekdiagram	:	Parabolisch - rechthoekig diagram			
Staalsoort	:	B500A	Symm.wapening:	2-zijdig	
f_{yk}	[N/mm ²] :	500	ϵ_{uk}	[%] :	2.5
Productiewijze	:	Koudgeformd			
Soort spanningsrekdiagram	:	Bi-lineair diagram met klimmende tak			
Basiswapening	[mm] :	ø8.0 hoh 150	Bijlegw.[mm] :	ø 8.0, 8.0	
Hoofdwapening in laag	:	1	Verdeelw.[mm]:	ø 0.0	

Betondekking

Milieu	:	XC1		
Gestort tegen bestaand beton	:	Nee		
Element met plaatgeometrie	:	Nee		
Specifieke kwaliteitsbeheersing	:	Nee		
Oneffen beton oppervlak	:	Nee		
Ondergrond	:	Glad / N.v.t.		
Constructieklasse	:	S3		
Grootste korrel	:	31.5		
Hoofdwapening	:	1ste laag		
Nominale dekking	:	15		
Toegepaste dekking	:	15		
Gelijkwaardige diameter	:	8		
$C_{min,b}$ $C_{min,dur}$ ΔC_{dur}	:	8	10	0
C_{min} ΔC_{dev} C_{nom}	:	10	5	15

Maatgevende belastingcombinatie 2: vgl10a (Fundamenteel)

Tussenresultaten		X-as	BC2
Traagheidsmoment I	[mm ⁴]	:	8333e4
Kniklengte l ₀	[mm]	:	3000
Art. 5.8.4 (2)			
kruipfactor ($\varphi_{ef}(o_n, t_0)$)		:	3.17
Art. 5.2 (7)			
Basis imperfectie (θ_0)		:	0.003333
Factor (α_h)		:	1.000
Aantal elementen (m)	[st]	:	1
Factor (α_m)		:	1.000
Imperfectie (θ_i)		:	0.003333
Excentriciteit e ₁	[mm]	:	5.000000
Art. 5.8.3.1 (1)			
Lambda (λ)		:	103.92
Wapeningsoppervlak (A _s)	[mm ²]	:	375
Betonoppervlak (A _c)	[mm ²]	:	100000
Betondruksterkte (f _{cd})	[N/mm ²]	:	20.00
Moment (M ₀₁)	[kNm]	:	1.56
Moment (M ₀₂)	[kNm]	:	1.56
Moment ratio (r _m)		:	1.000
Factor A		:	0.612
Factor B		:	1.078
Factor C		:	0.700
Grensslankheid (λ_{lim})		:	23.39
Volstaat 1e orde toetsing?		:	Nee
Art. 5.8.8.3			
Nuttige hoogte (d)		:	81
Vloei grens (f _{yd})		:	434.8
Elasticiteitsmodulus (E _s)		:	200000
Factor (ω)		:	0.081
Factor (n _u)		:	1.0815
Factor (n _{ba1})		:	0.4000
Factor (n)		:	0.1559
Coëfficiënt K _r		:	1.0000
Factor (β)		:	-0.1928
Coëfficiënt K φ		:	1.0000
Kromming (1/r ₀)		:	5.9641e-5
Glob. kromming (1/r)		:	5.9641e-5
Art. 5.8.8.2			
Krommingsverdeling factor c		:	10.0
Excentriciteit e ₂	[mm]	:	53.7
M ₂	[kNm]	:	16.74
M _{0e}	[kNm]	:	1.56
M _{Ed, boven}	[kNm]	:	-6.81
M _{Ed, veld}	[kNm]	:	18.30
M _{Ed, onder}	[kNm]	:	-6.81
N _{Ed}	[kN]	:	311.85
M _{Ed}	[kNm]	:	18.30

Art. 6.1 (4)

Minimale excentriciteit e_0 [mm] : 20.00
 $M_{Ed, min}$ [kNm] : 6.24

Berekende gegevens

X-as

BC2

Berekend moment $M_{Ed, ber}$ [kNm] : 18.30
 Min. wap. art. 9.6.2(1) [mm²/m] : 0.0
 Min.wap. art. 9.6.2(1)&(3) [mm²/m] : 130.9 =2x(ø5.0 hoh 300)
 Min. wap. trekzone 7.3.2 [mm²/m] : 0.0
 Tot. ber. wap. 1e/2e orde [mm²/m] : 374.3
 Maatgevende wapening [mm²/m] : 374.3

Tussenresultaten doorsnede X-as

BC2

Voorwaarde Eps;c=Eps;cu2 op de vezel $y = -50.0$ mm

y [mm]	Wapening	Perc. [o/o]	A_s/A_p [mm ²]	$\Delta\epsilon$ [o/oo]	σ_b [N/mm ²]	$\Delta\sigma_s$ [N/mm ²]
-50.0				-3.500	-20.00	-
-31.0	3.723Ø8	100	187.2	-0.604	-	-120.83
31.0	3.723Ø8	100	187.2	8.845	-	441.14

374.3

Inwendige krachten

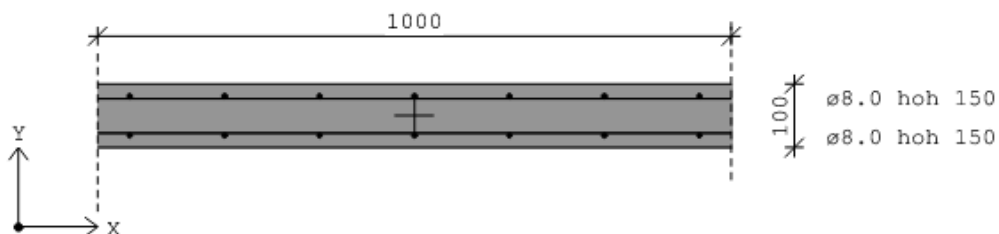
y [mm]	N_p [kN]	$N_s/\Delta N_p$ [kN]	Δy [mm]	N [kN]	$N*\Delta y$ [kNm]
-40.4	-371.797		-40.4	-371.797	15.038
-31.0		-22.614	-31.0	-22.614	0.701
31.0		82.562	31.0	82.562	2.559

totaal inwendig -311.850 18.299

Gevonden wapening

basiswapening

extra staven

Bijlegcombinatie 1 670 [mm²/m] : 2x(ø8.0 hoh 150)**Grafische uitvoer bijlegcombinatie 1**

A.3.3. Controle betonnen buitenwand dikte 100 mm

Geometrie

Type constructie	:	Wand
Wandbreedte	[mm] :	1000
Wanddikte in buigingsricht.	[mm] :	100
Wandhoogte (L)	[mm] :	3000
Belastingenschema	:	Geschoord
Kniklengtefactor X	:	1.00
Krommingsverdeling factor c X	:	10.00



Belasting

		BG1	BG2	BG3	Maatgevend BC
Omschrijving belastinggeval	:	Perm	Ver	Wind	
Normaalkracht N Ek	[kN] :	106.30	18.90	0.00	155.91
MEk, X boven	[kNm] :	0.00	0.00	-1.57	-2.35
MEk, X onder	[kNm] :	0.00	0.00	-1.57	-2.35
Belastingfactoren					
BC1 vgl10b	Fundamenteel :	1.20	1.50	1.50	Maatgevend X
BC2 vgl10a	Fundamenteel :	1.35	1.05	1.05	

Beton en Wapening

Betonkwaliteit	:	C30/37	Prefab	:	Nee
Soort spanningsrekdiagram	:	Parabolisch - rechthoekig diagram			
Staalsoort	:	B500A	Symm.wapening:	2-zijdig	
f_{yk}	[N/mm ²]	500	ϵ_{uk}	[%]	2.5
Productiewijze	:	Koudgevormd			
Soort spanningsrekdiagram	:	Bi-lineair diagram met klimmende tak			
Basiswapening	[mm] :	ø8.0 hoh 150		Bijlegw.[mm] :	ø 8.0, 8.0
Hoofdwapening in laag	:	1	Verdeelw.[mm] :	ø 0.0	

Betondekking

Milieu	:	XC1		
Gestort tegen bestaand beton	:	Nee		
Element met plaatgeometrie	:	Nee		
Specifieke kwaliteitsbeheersing	:	Nee		
Oneffen beton oppervlak	:	Nee		
Ondergrond	:	Glad / N.v.t.		
Constructieklasse	:	S3		
Grootste korrel	:	31.5		
Hoofdwapening	:	1ste laag		
Nominale dekking	:	15		
Toegepaste dekking	:	15		
Gelijkwaardige diameter	:	8		
$C_{min,b}$ $C_{min,dur}$ ΔC_{dur}	:	8	10	0
C_{min} ΔC_{dev} C_{nom}	:	10	5	15

Maatgevende belastingcombinatie 1: vgl10b (Fundamenteel)

Tussenresultaten		X-as	BC1
Traagheidsmoment I	[mm ⁴]	:	8333e4
Kniklengte l ₀	[mm]	:	3000
Art. 5.8.4 (2)			
kruipfactor ($\phi_{ef}(on, t_0)$)		:	3.17
Art. 5.2 (7)			
Basis imperfectie (θ_0)		:	0.003333
Factor (α_h)		:	1.000
Aantal elementen (m)	[st]	:	1
Factor (α_m)		:	1.000
Imperfectie (θ_i)		:	0.003333
Excentriciteit e ₁	[mm]	:	5.000000
Art. 5.8.3.1 (1)			
Lambda (λ)		:	103.92
Wapeningsoppervlak (A _s)	[mm ²]	:	260
Betonoppervlak (A _c)	[mm ²]	:	100000
Betondruksterkte (f _{cd})	[N/mm ²]	:	20.00
Moment (M ₀₁)	[kNm]	:	-3.13
Moment (M ₀₂)	[kNm]	:	-3.13
Moment ratio (r _m)		:	1.000
Factor A		:	0.612
Factor B		:	1.055
Factor C		:	0.700
Grensslankheid (λ_{lim})		:	32.36
Volstaat 1e orde toetsing?		:	Nee
Art. 5.8.8.3			
Nuttige hoogte (d)		:	81
Vloegrens (f _{yd})		:	434.8
Elasticiteitsmodulus (E _s)		:	200000
Factor (ω)		:	0.057
Factor (n _u)		:	1.0566
Factor (n _{bal})		:	0.4000
Factor (n)		:	0.0780
Coëfficiënt K _r		:	1.0000
Factor (β)		:	-0.1928
Coëfficiënt K ϕ		:	1.0000
Kromming (1/r ₀)		:	5.9641e-5
Glob. kromming (1/r)		:	5.9641e-5
Art. 5.8.8.2			
Krommingsverdeling factor c		:	10.0
Excentriciteit e ₂	[mm]	:	53.7
M ₂	[kNm]	:	8.37
M _{0e}	[kNm]	:	-3.13
M _{Ed, boven}	[kNm]	:	1.05
M _{Ed, veld}	[kNm]	:	-11.50
M _{Ed, onder}	[kNm]	:	1.05
N _{Ed}	[kN]	:	155.91
M _{Ed}	[kNm]	:	11.50

Art. 6.1 (4)

Minimale excentriciteit e_0 [mm] : 20.00
 $M_{Ed, min}$ [kNm] : 3.12

Berekende gegevens

		X-as	BC1
Berekend moment $M_{Ed, ber}$	[kNm]	11.50	
Min. wap. art. 9.6.2 (1)	[mm ² /m]	0.0	
Min. wap. art. 9.6.2 (1) & (3)	[mm ² /m]	130.9 = 2x(ø5.0 hoh 300)	
Min. wap. trekzone 7.3.2	[mm ² /m]	0.0	
Tot. ber. wap. 1e/2e orde	[mm ² /m]	259.7	
Maatgevende wapening	[mm ² /m]	259.7	

Tussenresultaten doorsnede X-as

BC1

Voorwaarde Eps;c=Eps;cu2 op de vezel $y = -50.0$ mm

y [mm]	Wapening	Perc. [o/o]	A_s/A_p [mm ²]	$\Delta\epsilon$ [o/oo]	σ_b [N/mm ²]	$\Delta\sigma_s$ [N/mm ²]
-50.0				-3.500	-20.00	-
-31.0	2.58308	100	129.8	0.991	-	198.16
31.0	2.58308	100	129.8	15.645	-	447.61
			259.7			

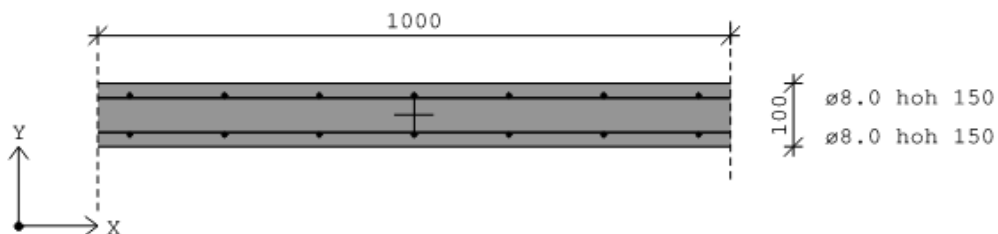
Inwendige krachten

y [mm]	N_p [kN]	$N_s/\Delta N_p$ [kN]	Δy [mm]	N [kN]	$N*\Delta y$ [kNm]
-43.8	-239.749		-43.8	-239.749	10.511
-31.0		25.727	-31.0	25.727	-0.798
31.0		58.112	31.0	58.112	1.801
totaal inwendig				-155.910	11.515

Gevonden wapening

basiswapening

extra staven

Bijlegcombinatie 1 670 [mm²/m] : 2x(ø8.0 hoh 150)**Grafische uitvoer bijlegcombinatie 1****A.4. Controle scheuren van beton**

Voor de betonvloeren is een controle uitgevoerd om te bepalen of het beton is gescheurd. Daarmee wordt het scheurmoment vergeleken met het quasi-permanente moment.

$$M_{cr} = (f_{ctm} - \frac{N_{ed}}{A_c})W_t = \frac{(2900 - 0)0,21^2}{6} = 21,315kNm$$

$$M_k = \frac{(0,21 \cdot 25 + 1,265 + 0,4 \cdot 1,75) * 5,4^2}{8} = 26,3kNm$$

M_{cr} is kleiner dan M_k dus, beton scheurt bij de quasi-permanente situatie en daarom mag voor de vloeren rekening worden gehouden met de gescheurde elasticiteitsmodulus:

$$E_{beton,vloeren} = E_{gescheurd} = 15000N/mm^2$$

B

Bepalen effectiefste ontwerpmaatregelen

Bijlage B beschrijft de methode voor het bepalen van de effectiefste ontwerpmaatregelen. Deze zijn bepaald aan de hand van de literatuur. De eigenfrequenties van de modellen met verschillende ontwerpmaatregelen zijn vergeleken met de eigenfrequentie van de referentiemodellen. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen balkmodellen en raamwerkmodellen. Tot slot is een conclusie getrokken over de parameters die nuttig worden geacht om te implementeren in de numerieke plaatmodellen.

B.1. Eigenfrequentie referentie modellen

Om de ontwerpmaatregelen met elkaar te kunnen vergelijken is gekeken naar de eigenfrequenties van de vloeren. Zowel balk- als raamwerkmodellen zijn geanalyseerd. Ook is onderscheid gemaakt tussen modellen met scharnierende en ingeklemde vloeren.

De eigenfrequenties van de balkmodellen met scharnierende en ingeklemde vloeren zijn getoond in Tabel B.1. Uit deze tabel blijkt dat de eerste eigenfrequentie 6,8 Hz voor scharnierende vloeren en 15,2 Hz voor ingeklemde CLT-vloeren bedraagt. De eigenfrequenties van de

Tabel B.1: Eerste eigenfrequentie van de CLT-balkmodellen

CLT	Scharnierend	Ingeklemd
N	f [Hz]	f [Hz]
1	6,76	15,21

raamwerkmodellen zijn bepaald met een eindigelementen programma. Hierbij zijn de eerste 40 eigenfrequenties berekend die betrekking hebben op het totale raamwerk. Het blijkt dat de eerste 4 eigenfrequenties te relateren zijn aan de eigenfrequentie van de vloeren, deze eigenfrequenties zijn weergegeven in Tabel B.2.

B.2. Gevoeligheidsanalyse

In deze paragraaf is het effect van de ontwerpmaatregelen uit de literatuur op de eigenfrequentie van de vloeren bestudeerd. Het doel van deze analyse is het beoordelen van de effectiviteit van verschillende maatregelen. Vervolgens zijn de effectiefste ontwerpmaatregelen geanalyseerd in de numerieke plaatmodellen en zijn getoetst op het risico van trillingshinder in de

Tabel B.2: De eigenfrequenties van het CLT en betonnen raamwerkmodel behorende bij de vloeren

CLT N	Scharnierend f [Hz]	Ingeklemd f [Hz]
1	6,66	7,06
2	6,75	7,35
3	6,76	7,65
4	6,76	7,85

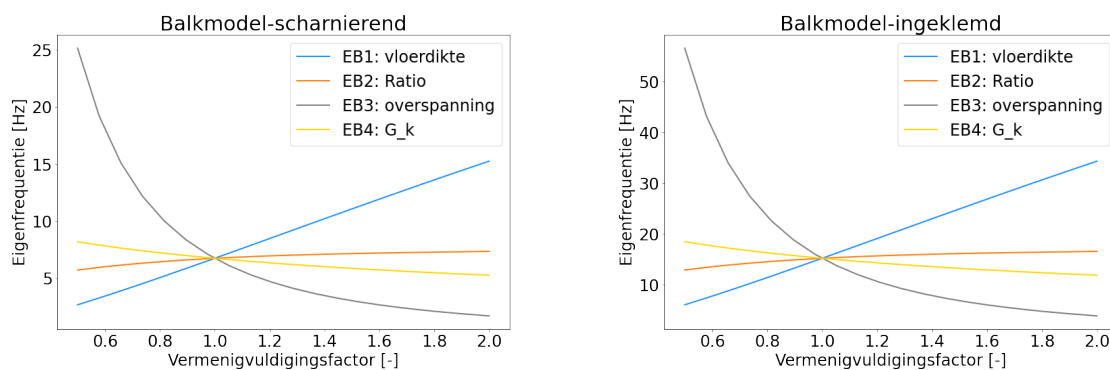
casus. De ontwerpmaatregelen bij de balkmodellen zijn voornamelijk gebruikt om het effect van de doorsnede aan te tonen. De raamwerkmodellen geven het effect van verschillende maatregelen op het systeem weer.

B.2.1. Gevoeligheidsanalyse - balkmodel

In de gevoeligheidsanalyse van het balkmodel zijn de parameters; plaatdikte, ratio R, overspanningslengte en permanente belasting beschouwd. De eigenfrequentie van de balkmodellen zijn bepaald aan de hand van een variërende parameter. De parameters starten met een vermenigvuldigingsfactor van 0,5 en eindigen met een vermenigvuldigingsfactor van 3. Dit resulteert in een verloop van de plaatdikte van 80 mm naar 480 mm, de overspanning van 2,7 m naar 13,5 m, de ratio van 0,125 naar 0,75 en de permanente belasting van 0,6325 naar 3,795.

Bij de parameter 'ratio R' zijn de waardes betrouwbaar tot een factor van 2 (overeenkomend met een ratio R van 0,5). Het gebied met een vermenigvuldigingsfactor na de 2 moet voor de ontwerpmaatregel ratio-R als incorrect worden beschouwd.

De gevoeligheidsanalyse voor de balkmodellen zijn weergegeven in Figuren B.1a en B.1b. Uit de Figuren blijkt dat de trend van de ratio van de buitenste laagdiktes (ratio-R) en de permanente belasting (G_k) een zeer licht exponentieel karakter hebben, vergeleken met de trends van de overspanning en totale plaatdikte. De eigenfrequenties van de maatregelen zijn weergegeven in Tabel B.3 voor een vermenigvuldigingsfactor van 0,5 en 2. Ook blijkt uit de tabel dat het vergroten van de vloerdikte en de overspanning een significant grotere toe- en afname hebben vergeleken met de ratio-R en de permanente belasting. De toe- en afname voor de scharnierende en ingeklemde balkmodellen zijn gelijk.



(a) Lineaire eigenfrequentie van scharnierend balkmodel bij toename parameters met factor 2

(b) Lineaire eigenfrequentie van ingeklemd balkmodel bij toename parameters met factor 2

Figuur B.1: Vergelijking invloed ontwerpmaatregelen op eigenfrequentie balkmodel bij een vermenigvuldigingsfactor van 0,5 en 2

Tabel B.3: Resultaten gevoeligheidsanalyse balkmodellen bij een vermenigvuldigingsfactor van 0,5 en 2

Model Factor Ontwerpmaatregel	Scharnierend			Ingeklemd			Verschil t.o.v. ref	
	0,5	1 (ref)	2	0,5	1 (ref)	2	$\Delta_{0,5}$	Δ_2 [%]
	f [Hz]	f [Hz]	f [Hz]	f [Hz]	f [Hz]	f [Hz]		
EB1: vloerdikte	2,7	6,76	15,2	6,1	15,2	34,3	-60 / 125	
EB2: ratio-R	5,7	6,76	7,4	12,9	15,2	16,6	-15 / 9	
EB3: overspanning	25,1	6,76	1,7	56,6	15,2	3,9	271 / -75	
EB4: G_k	8,2	6,76	5,3	18,5	15,2	11,9	21 / -22	

B.2.2. Gevoeligheidsanalyse - raamwerkmodel

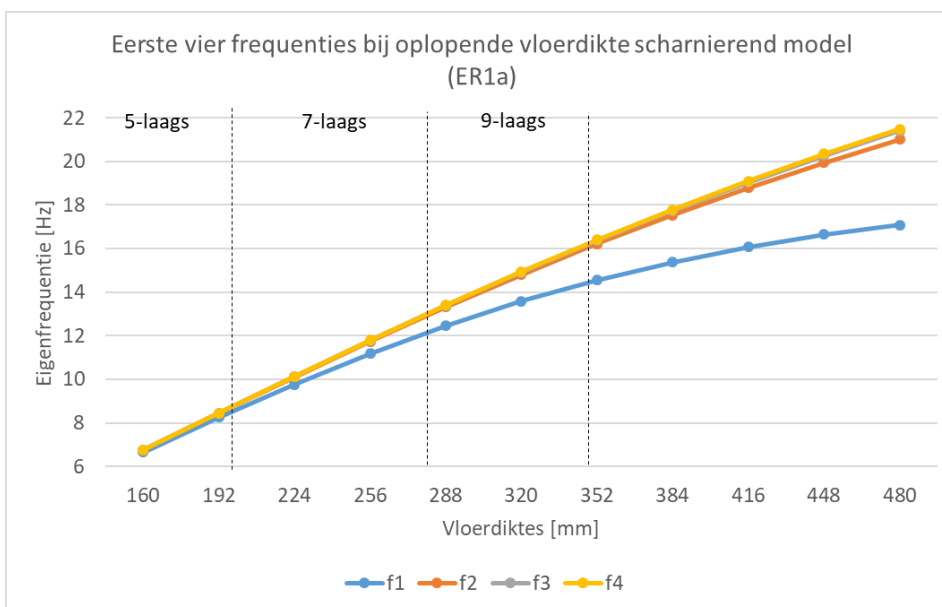
Voor het effect van de ontwerpmaatregelen bij de raamwerkmodellen is gekeken naar; vloerdikte, wanddikte, combinatie van vloer- en wanddikte, overspanning, en enkele en dubbele beuken. Bij de ontwerpmaatregelen die een directe relatie hebben met de plaatdiktes, representeren de verticale gestreepte lijnen de maximale plaatdikte voor een bepaald aantal lagen, waarbij standaardmaten uit de praktijk zijn gekozen.

Vloerdikte

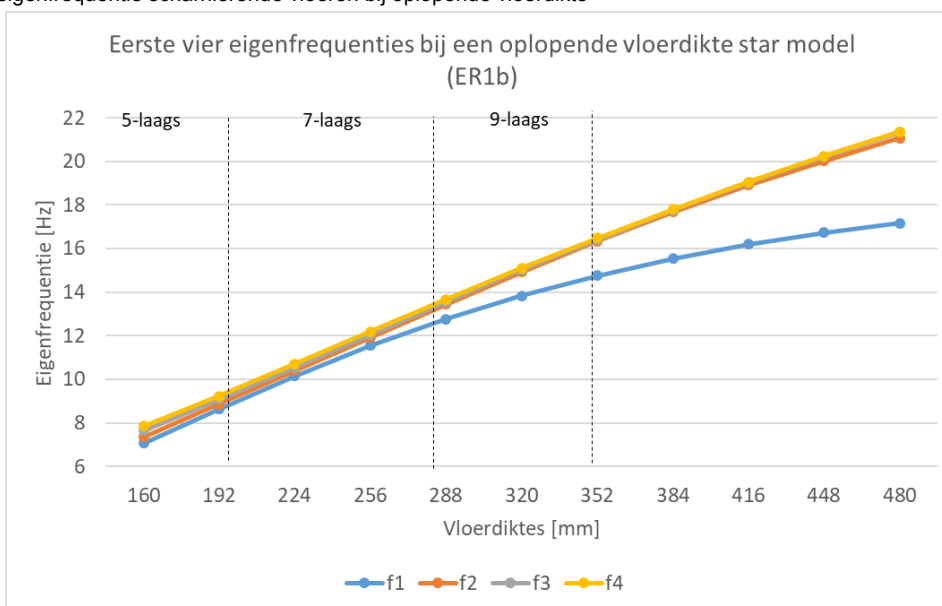
In Figuren B.2a en B.2b zijn de eerste 4 eigenfrequenties geanalyseerd voor respectievelijk het scharnierende en ingeklemde raamwerkmodel, hierbij is de vloerdikte vergroot van 160 mm naar 480 mm op basis van een 5-laagse CLT-plaat. De referentiemodellen zijn vergeleken met een 5-laagse plaatdikte van 352 mm dik. Deze dikte correspondeert met de effectieve hoogte van een 9-laagse plaat van 360 mm. Bij vergelijken van beide Figuren valt op te merken dat de scharnierende en ingeklemde modellen bij een olopemde vloerdikte nauwelijks een verschil in eigenfrequentie tonen. Ook is opvallend dat de eerste eigenfrequentie van het raamwerk een lagere trend laat zien, vergeleken met de overige eigenfrequenties. Het blijkt uit Tabel B.4 dat het verdikken van 160 mm naar 352 mm resulteert in een stijging van 120% tot 140% op de eigenfrequentie van de vloeren.

Tabel B.4: Resultaten gevoeligheidsanalyse raamwerkmodellen met een variërende vloerdikte

Model Plaatdikte Eigenfrequentie	Scharnierend			Ingeklemd		
	160 mm (ref)	352 mm	-	160 mm (ref)	352 mm	-
	f [Hz]	f [Hz]	Δ [%]	f [Hz]	f [Hz]	Δ [%]
f_1	6,66	14,6	129	7,06	14,8	109
f_2	6,75	16,2	140	7,35	16,4	123
f_3	6,76	16,4	143	7,65	16,4	114
f_4	6,76	16,4	143	7,85	16,5	110



(a) Verloop eigenfrequentie scharnierende vloeren bij oplopende vloerdikte



(b) Verloop eigenfrequentie ingeklemde vloeren bij verlopende vloerdikte

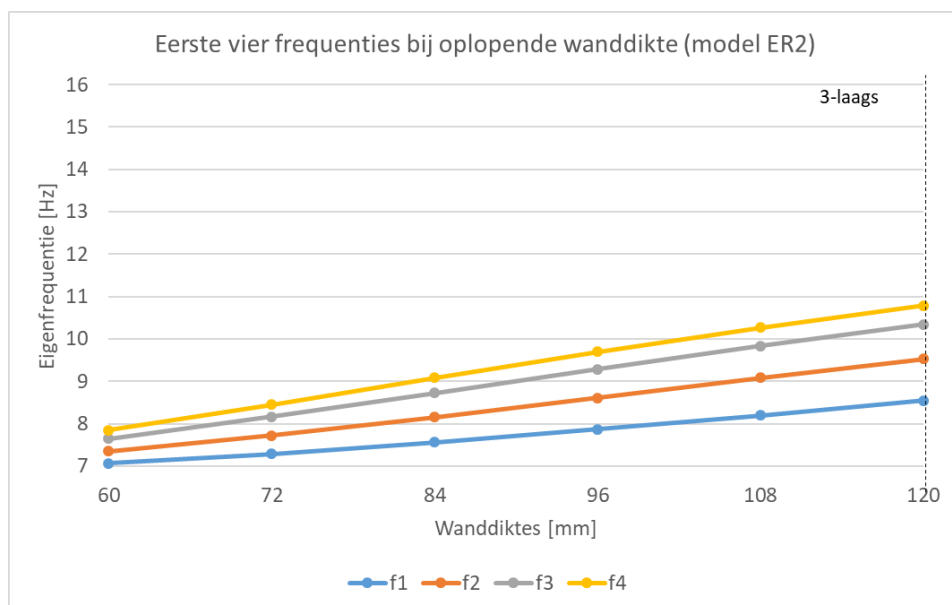
Figuur B.2: Gevoeligheid van ontwerpmaatregel: Variërende vloerdiktes

Wanddikte

Bij de tweede ontwerpmaatregel zijn de wanddiktes aangepast van 60 mm naar 120 mm, waarbij de vloeren ingeklemd zijn aangehouden. Het verloop is weergegeven in Figuur B.3, hierin zijn de eerste vier eigenfrequenties van het raamwerk weergegeven, die corresponderen met de eigenfrequenties van de vloeren. Het toepassen van een wanddikte van 120 mm resulteert in een stijging van 21% tot 37% op de eigenfrequentie van de vloeren, zoals weergegeven in Tabel B.5.

Combinatie vloer- en wanddikte

Behalve het individueel verdikken van zowel de wanden als de vloeren is ook de combinatie van beide geanalyseerd. Hierbij is de vloerdikte verhoogd, waarbij vijf verschillende wanddiktes



Figuur B.3: Gevoeligheid van ontwerpmaatregel: Variërende wanddiktes

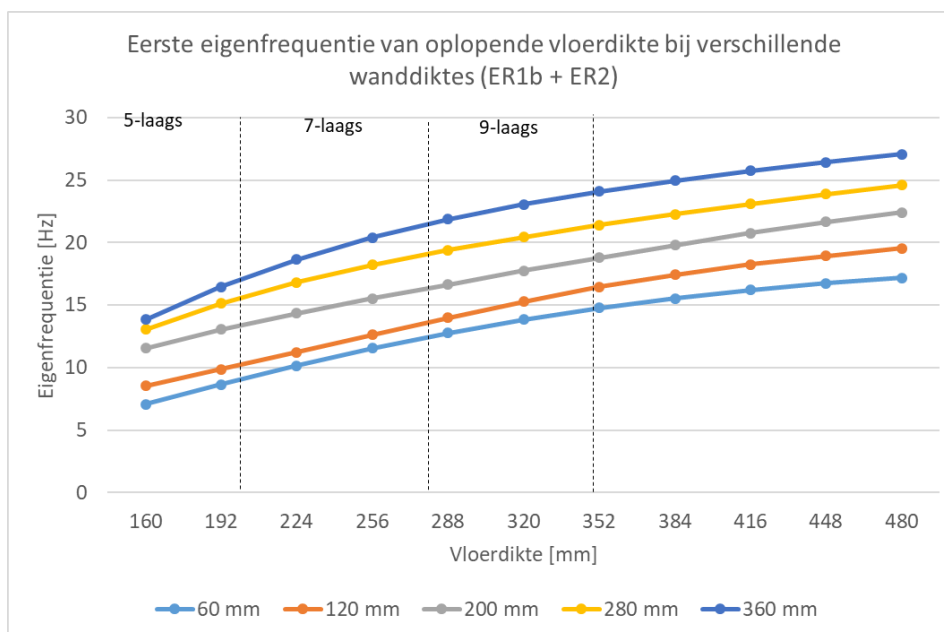
Tabel B.5: Resultaten gevoeligheidsanalyse raamwerkmodellen met variërende vloerdikte

Model	Ingeklemd		
	Plaatdikte	60 mm (ref)	120 mm -
Eigenfrequentie	f [Hz]	f [Hz]	Δ [%]
f_1	7,06	8,55	21
f_2	7,35	9,53	30
f_3	7,65	10,34	35
f_4	7,85	10,79	37

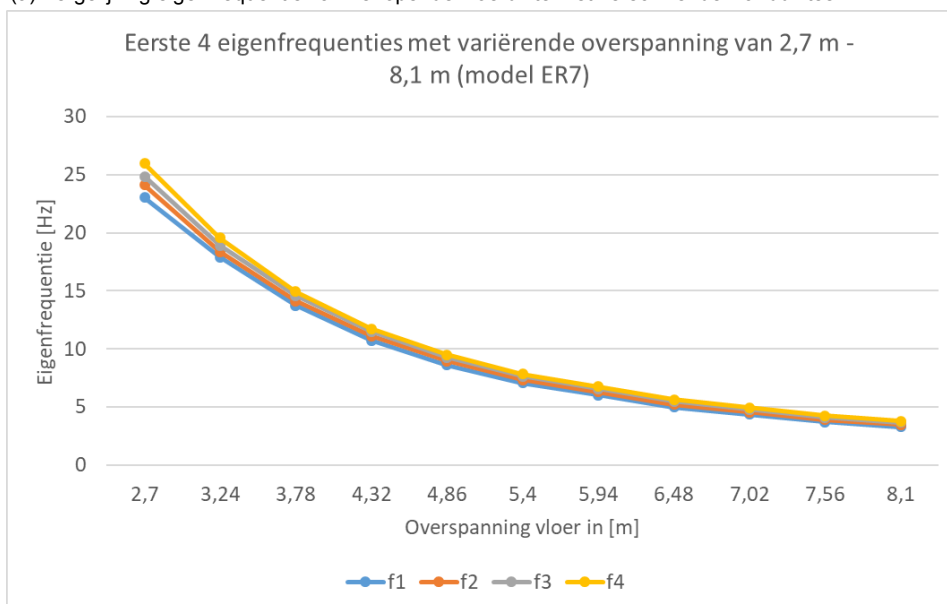
zijn toegepast: 60 mm, 120 mm, 200 mm, 280 mm en 360 mm. Figuur B.4a toont de eigenfrequenties van deze maatregel. Uit tabel B.6 blijkt dat de maatregel resulteert in een stijging van de eigenfrequentie tot de 24,08 Hz. Door het kiezen van dikkere wanden stijgt ook het buigende moment in de vloer-wand aansluiting van circa 2 kNm naar 12 kNm. In de praktijk is het kostbaar om buigende momenten op te nemen, zo ook voor hout, dit gebeurt namelijk met kostbare verbindingen. Daarom is deze ontwerpmaatregel minder relevant bevonden voor toepassing bij het CLT-model.

Tabel B.6: Resultaten gevoeligheidsanalyse raamwerkmodellen met de combinatie van variërende vloer- en wanddikte

Model	Ingeklemd		
	Vloerdikte	160 mm (ref)	352 mm -
Wanddikte	f [Hz]	f [Hz]	Δ [%]
60 mm	7,06	14,76	109
120 mm	8,55	16,46	93
200 mm	11,54	18,80	63
250 mm	13,05	21,39	68
360 mm	13,85	24,08	74



(a) Vergelijking eigenfrequentie van verlopende vloerdikte met verschillende wanddiktes



(b) Verloop eigenfrequentie starre vloeren bij oplopende overspanning

Overspanning

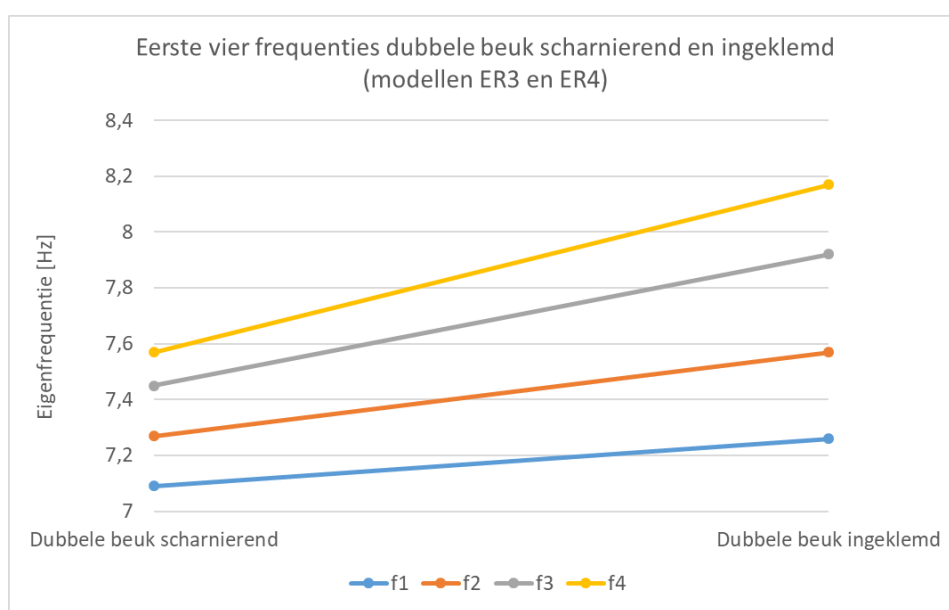
De referentie overspanning is zowel vergroot als verkleind naar 8,1 m en 2,7 m. Figuur B.4b toont een sterke trend van de eigenfrequentie bij het variëren van de overspanning. Tabel B.7 toont de corresponderende waarden. Het blijkt hieruit dan het variëren van de overspanning resulteert in een stijging en daling van de eigenfrequenties van -53% tot 231%.

Enkele en dubbele beuk

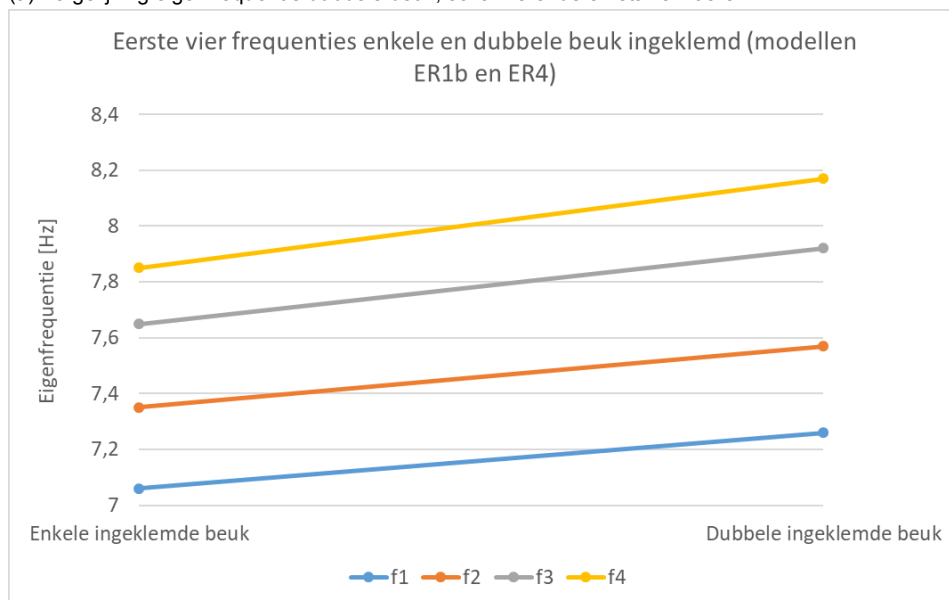
Het effect op de eigenfrequentie bij het modelleren van een dubbele beuk blijkt een gematigd resultaat te hebben vergeleken de andere ontwerpmaatregelen, zo blijkt uit Figuren B.5a en B.5b. De absolute stijging van de eigenfrequentie van uit beide figuren ligt tussen de 0,15 Hz en 0,6 Hz. Het blijkt uit Tabel B.8 de het verschil in de eigenfrequentie 3% tot en met 8% bedraagt. Vergelijken met de andere maatregelen is de het kleinste verschil.

Tabel B.7: Resultaten gevoeligheidsanalyse raamwerkmodellen met variërende overspanning

Model	Ingeklemd			Verskil
	2,7 m	5,4 m	8,1 m	
Overspanning	2,7 m	5,4 m	8,1 m	$\Delta_{2,7m} / \Delta_{8,1m}$ [%]
Eigenfrequentie	f [Hz]	f [Hz]	f [Hz]	
f_1	23,0	7,06	3,30	200 / -53
f_2	24,1	7,35	3,48	228 / -53
f_3	24,8	7,65	3,66	224 / -52
f_4	26,0	7,85	3,80	231 / -52



(a) Vergelijking eigenfrequentie dubbele beuk, scharnierende en starre vloeren



(b) Vergelijking eigenfrequentie enkele en dubbele ingeklemde beuk

Figuur B.5: Vergelijking invloed parameters op eigenfrequentie vloer CLT-raamwerkmodellen

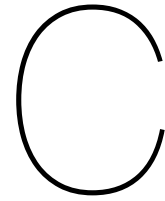
B.3. Conclusie

Het effect van de ontwerpmaatregelen voor de balkmodellen en raamwerkmodellen zijn geanalyseerd. Voor balkmodellen blijken voornamelijk de totale plaatdikte en de overspanning

Tabel B.8: Resultaten gevoeligheidsanalyse raamwerkmodellen bij enkele en dubbele beuken

Model	Dubbele beuk scharnierend naar dubbele beuk ingeklemd			Enkele ingeklemde beuk naar dubbele ingeklemde beuk		
	160 mm (ref)	352 mm	-	160 mm (ref)	352 mm	-
Eigenfrequentie	f [Hz]	f [Hz]	Δ [%]	f [Hz]	f [Hz]	Δ [%]
f_1	7,09	7,26	2	7,06	7,26	3
f_2	7,27	7,57	4	7,35	7,57	3
f_3	7,45	7,92	6	7,65	7,92	4
f_4	7,57	8,17	8	7,85	8,17	4

een significant effect te hebben op de eigenfrequentie. Bij de raamwerkmodellen zijn de effectiefste ontwerpmaatregelen; het variëren van de vloerdikte, het variëren van de wanddikte, het variëren van de overspanning en de combinatie van vloer- en wanddikte. Echter resulteert de ontwerpmaatregel van de combinatie vloer- en wanddikte in momenten bij de vloer-wandaansluiting die dusdanig groot zijn, dat de uitvoering hiervan kostbaar is en daarom praktisch minder relevant is bevonden. Dus de ontwerpmaatregelen die worden meegenomen vanuit de literatuurstudie naar het eindig elementen model zijn het variëren van de vloerdikte, het variëren van de wanddikte en het variëren van de overspanning.



Gevoeligheid van demping op CLT-model

Deze paragraaf behandelt het effect van demping bij de frequentierespons analyse en de lineaire tijdsafhankelijke analyse. Hiermee wordt de gevoeligheid van demping van het CLT-referentiemodel aangetoond. Dit model heeft 3,5% modale demping of Rayleigh-coëfficiënten corresponderend met deze modale demping. De modellen waarmee wordt vergeleken hebben een modale demping van 1%, 2,5% en 5%. Allereerst wordt het effect van demping geanalyseerd voor de omhullende frequentierespons analyse. Daarna is het effect van demping onderzocht voor de waarde voor trillingshinder.

C.1. Frequentierespons analyse

Voor het CLT-referentiemodel zijn drie extra analyses uitgevoerd, waarbij de modale demping is aangepast. Figuur C.1 toont de omhullende frequentierespons analyses voor de modellen met variërende demping. Het toepassen van meer demping resulteert in het afvlakken van de resonantiepieken.

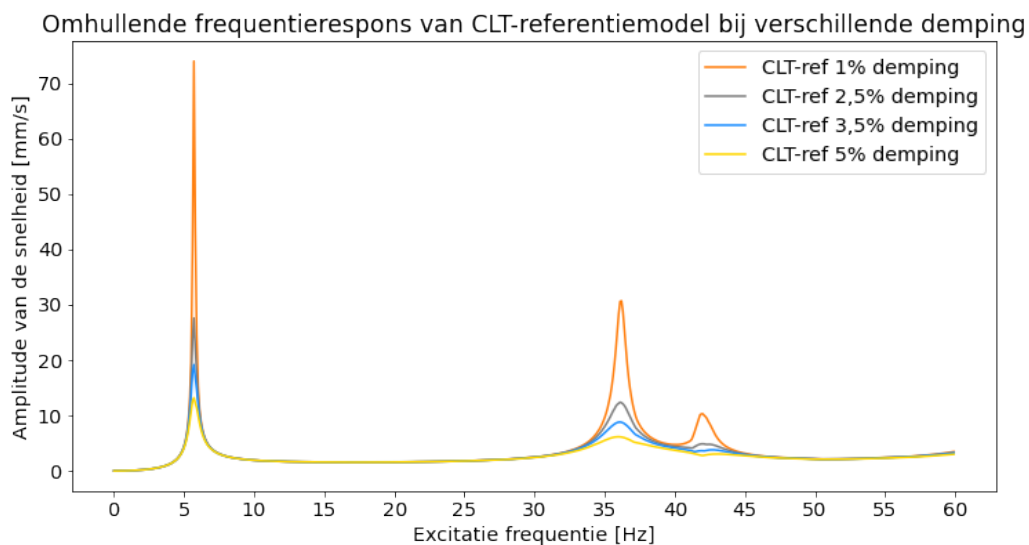
De waarden van de amplitude van de eerste en tweede resonantiepieken zijn weergegeven in Tabel C.1. Ook is het verschil ten opzichte van het referentiemodel met 3,5% modale demping getoond. Deze waarden zijn verwerkt in Figuur C.2. De frequentierespons analyse toont de sterkte daling tussen 1% en 2,5% modale demping. Vanaf 3,5% modale demping tonen de grafieken een waarneembare zwakkere daling.

Tabel C.1: Waarden van de eerste en tweede resonantiepieken bij variërende modale demping

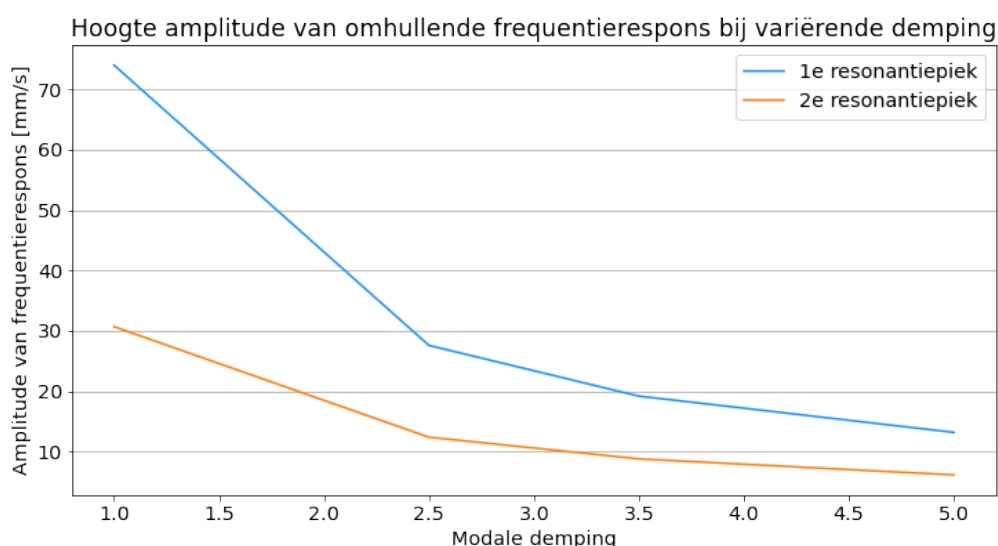
Modale demping	1 ^e piek		2 ^e piek	
	\hat{v} [mm/s]	Δ [%]	\hat{v} [mm/s]	Δ [%]
1%	74	285	30,7	249
2,5%	27,6	44	12,4	41
Referentiemodel: 3,5%	19,2	-	8,8	-
5%	13,2	-17	6,2	-30

C.1.1. Conclusie

Uit de resultaten is geconcludeerd dat demping een significant effect heeft op de analyse. De amplitude van de eerste resonantiepiek verschilt met 285% bij het vergelijken van 1% en 3,5%



Figuur C.1: Omhullende frequentierespons analyse van het CLT-referentiemodel bij variërende demping



Figuur C.2: Amplitude van de eerste en tweede resonantiepieken van omhullende frequentierespons analyse van het CLT-referentiemodel bij variërende demping

modale demping. Echter is convergentie waarneembaar met het gevolg dat de gevoeligheid van demping op het model afneemt naar mate de demping toeneemt.

C.2. Tijdsafhankelijke lineaire analyse

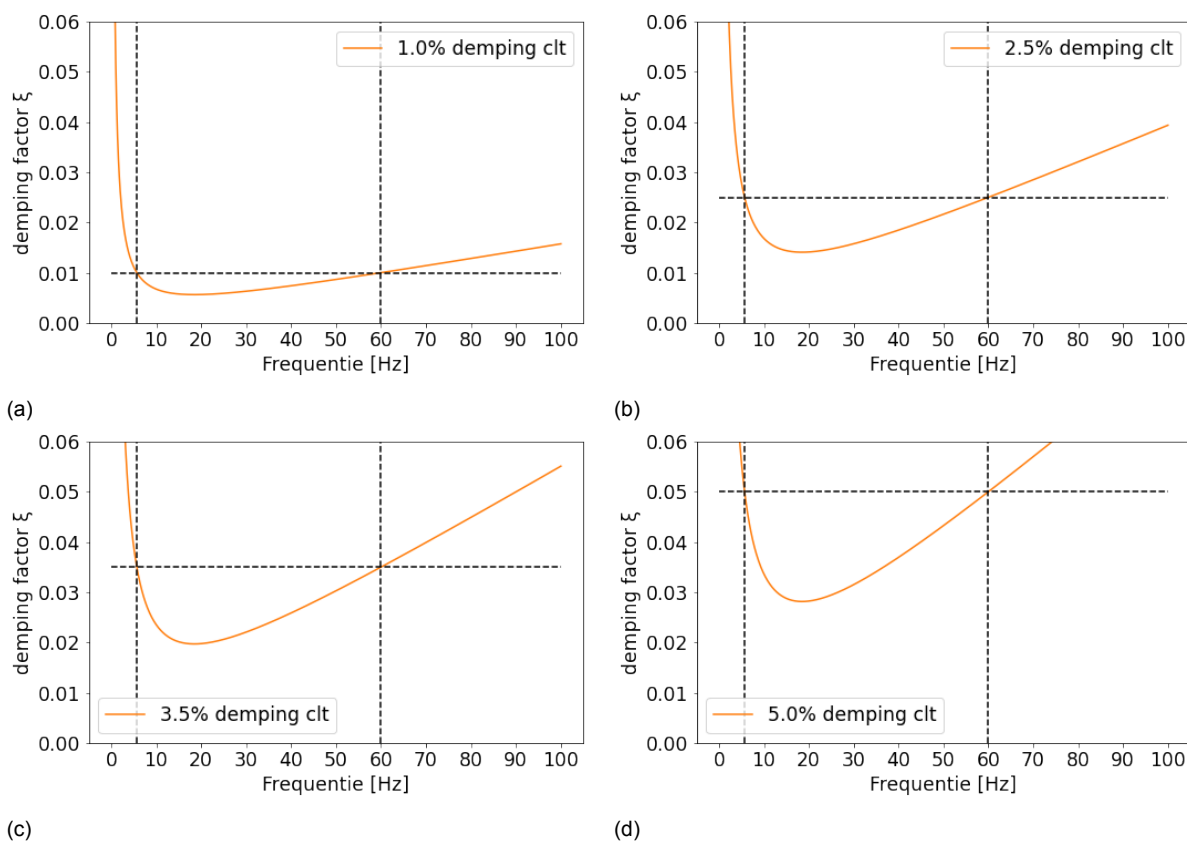
In deze paragraaf is het effect van demping onderzocht op de maximale voortschrijdende waarde. De demping is toegevoegd in de lineaire tijdsafhankelijke analyse aan de hand van Rayleigh-coëfficiënten. Deze coëfficiënten corresponderend met specifieke modale demping berekend op 5,7 Hz en 60 Hz. In Tabel C.2 zijn de coëfficiënten weergegeven.

In Figuur C.3 is de Rayleigh-demping afgezet tegen de frequentie. Zichtbaar is dat de demping in het domein tussen de 5,7 Hz en 60 Hz resulteert in een **onderschatting** van

Tabel C.2: Toegepaste Rayleigh-coëfficiënten corresponderend bij verschillende waarden van de modale demping op 5,7 Hz en 60 Hz.

modale demping ξ	Rayleigh demping α	Rayleigh demping β
1%	0,654	4,845E-5
2,5%	1,635	1,211E-4
3,5%	2,289	1,453E-4
5%	3,271	2,422E-4

de modale demping. Tegenovergesteld geeft de Rayleigh-demping buiten het aangegeven frequentiedomein een **overschatting** van de modale demping.

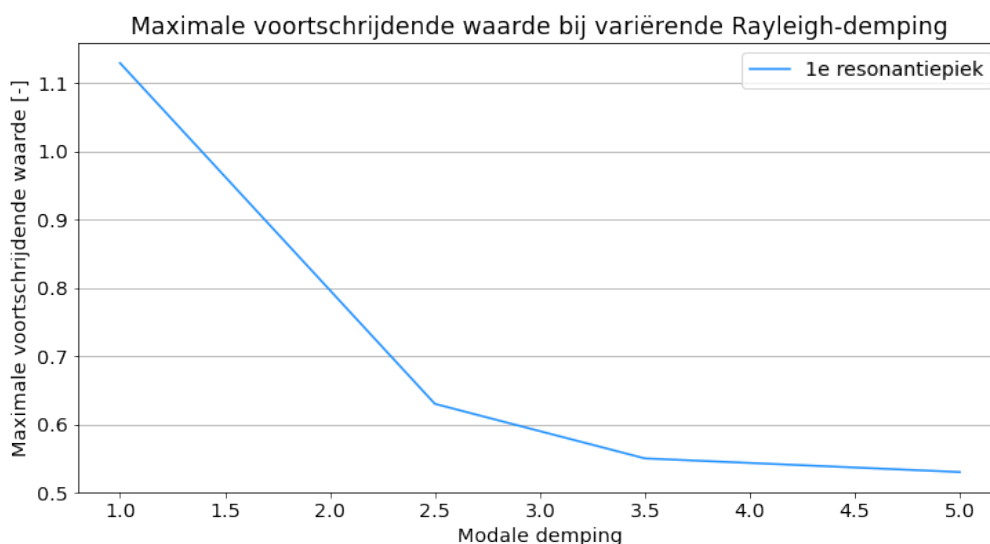


Figuur C.3: Demping factor bepaald door de Rayleigh-coëfficiënten afgezet tegen de frequentie. Hierbij zijn de Rayleigh-coëfficiënten bepaald op basis van 1% (a), 2,5% (b), 3,5% (c) en 5% (d) modale demping op 5,7 Hz en 60 Hz. Dit is schetsmatig weergegeven met de snijpunten van de gestippelde lijnen.

De maximale voortschrijdende effectieve waarde is bepaald voor het bestuderen van het effect van demping op het model. Voor het bepalen van de maximale voortschrijdende effectieve waarde is gebruik gemaakt van de lineaire tijdsafhankelijke analyse. In deze analyse zijn de Rayleigh-coëfficiënten toegevoegd. Tabel C.3 toont maximale effectieve voortschrijdende waarde waarbij de Rayleigh-coëfficiënten zijn bepaald op basis een variërende modale demping. Uitgezonderd van 1% demping, liggen de waarden V_{max} relatief dicht bij elkaar. Dit is ook zichtbaar in Figuur C.4. Convergentie lijkt op te treden naar mate meer demping wordt toegepast. Hierbij is zichtbaar dat de grafiek tussen 3,5% en 5% een flauw dalende lijn vertoont.

-	V_{max} [-]	Δ [%]
1% demping	1,13	105
2,5% demping	0,63	15
3,5% demping	0,55	-
5% demping	0,53	-4

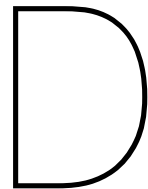
Tabel C.3: Maximale voortschrijdende effectieve waarde van het CLT-referentiemodel bij verschillende Rayleigh-coëfficiënten voor Rayleigh-demping, deze zijn bepaald aan de hand van een variërende modale demping op 5,7 Hz en 60 Hz



Figuur C.4: Maximale voortschrijdende effectieve waarde van het CLT-referentiemodel bij variërende Rayleigh-demping

C.2.1. Conclusie

Geconcludeerd wordt dat de maximale voortschrijdende effectieve waarde convergeert naar mate de demping toeneemt. Evenals bij de resultaten van de omhullende van de frequentierespons analyse blijkt lagere demping dan 2,5% te zorgen voor substantiële verschillen. Vanaf 3,5% blijkt het verschil in demping marginaal af te nemen.



Numerieke eigenschappen CLT

In de bijlage is berekening weergegeven waarmee de orthotrope matrix C_{CLT} is bepaald. De aangehouden materiaaleigenschappen zijn weergegeven in Tabel D.1.

Tabel D.1: Materiaaleigenschappen CLT met houtkwaliteit C24

Eigenschappen	Symbol	Waarde	
Elasticiteitsmodulus [21]	$E_{0,gem}$	11000	N/mm ²
Elasticiteitsmodulus [21]	$E_{90,gem}$	11000	N/mm ²
Glijmodulus [21]	$G_{0,gem}$	690	N/mm ²
Rol-afschuifmodulus [21]	$G_{R,gem}$	50	N/mm ²
Dichtheid [21]	ρ	450	kg/m ³

$$\mathbf{C}_{CLT} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ D_{21} & D_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{55} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{66} & D_{67} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{76} & D_{77} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{88} \end{bmatrix} \quad (D.1)$$

Met:

$$D_{11} = E_{0,gem} \cdot I_{0,net} - \text{buigstijfheid in longitudinale richting in [Nm}^2/\text{m];}$$

$$D_{22} = E_{0,gem} \cdot I_{90,net} - \text{buigstijfheid in transversale richting in [Nm}^2/\text{m];}$$

$$D_{12} = D_{21} = 0$$

$$D_{33} = 0.65 \cdot G_{0,gem} \cdot \frac{b \cdot h_{CLT}^3}{12} - \text{torsiestijfheid in [Nm}^2/\text{m];}$$

$$D_{44} = \kappa_0 \cdot (G_{0,gem} \cdot A_{0,net} + G_{R,gem} \cdot A_{90,net}) - \text{afschuifstijfheid in longitudinale richting in [N/m];}$$

$$D_{55} = \kappa_{90} (G_{90,gem} \cdot A_{90,net} + G_{R,gem} \cdot A_{0,net}) - \text{afschuifstijfheid in transversale richting in [N/m];}$$

$$\kappa_0, \kappa_{90} - \text{afshuif correctiefactoren;}$$

$$D_{66} = E_{0,gem} \cdot A_{0,net} - \text{axiale stijfheid in longitudinale richting in [N/m];}$$

$$D_{67} = D_{76} = 0$$

$$D_{77} = E_{90,gem} \cdot A_{90,net} - \text{axiale stijfheid in transversale richting in [N/m];}$$

$$D_{88} = 0,75 \cdot G_{0,gem} \cdot h_{CLT} - \text{afschuifstijfheid in het vlak in [N/m];}$$

$$E_{0,gem} - \text{longitudinale elasticiteitsmodulus in [N/m}^2/\text{m];}$$

$$E_{90,gem} - \text{transversale elasticiteitsmodulus in [N/m}^2/\text{m];}$$

$$I_{0,net} - \text{oppervlaktetraagheidsmoment in longitudinale richting in [m}^4\text{];}$$

$$I_{90,net} - \text{oppervlaktetraagheidsmoment in transversale richting in [m}^4\text{];}$$

$$A_{0,net} - \text{oppervlak van de longitudinale houtlagen in [m}^2\text{];}$$

$$A_{90,net} - \text{oppervlak van de transversale houtlagen in [m}^2\text{];}$$

$$G_{0,gem} - \text{afschuifmodulus in [N/m}^2/\text{m];}$$

$$h_{CLT} - \text{totale hoogte van de CLT-plaat in [m].}$$

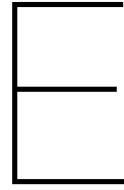
In Tabel D.2 zijn de tussenwaarden van de CLT-platen met een dikte van 60 mm tot en met 360 mm weergegeven. De afschuif correctiefactoren zijn aangehouden conform de CLT-handleiding van Borgström en Froöbel [22]. Met de materiaaleigenschappen en de tussenwaarden zijn alle benodigde waarden bekend waarmee de elementen van de orthotrope stijfheidsmatrix \mathbf{C}_{CLT} berekend kunnen worden. Deze elementen zijn per plaat weergegeven in Tabel D.3

h_{CLT}	$h_{0,net}$	$h_{90,net}$	$A_{0,net}$	$A_{90,net}$	$I_{0,net}$	$I_{90,net}$	κ_0	κ_{90}
[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[mm ²]	[mm ⁴ /m]	[mm ⁴ /m]	[-]	[-]
60	40	20	4E+4	2E+4	1,71E+7	6,67E+5	0,163	0,722
120	80	40	8E+4	4E+4	1,31E+8	5,33E+6	0,197	0,722
160	120	40	1,2E+5	4E+4	2,86E+8	3,62E+7	0,219	0,147
200	120	80	1,2E+5	8E+4	4,69E+8	1,31E+8	0,194	0,152
280	160	120	1,6E+5	1,2E+5	1,32E+9	5,33E+8	0,245	0,194
360	200	160	2E+5	1,6+E5	2,63E+9	1,32E+9	0,250	0,245

Tabel D.2: Tussenwaarden voor het berekenen van de orthotrope plaaieigenschappen

Tabel D.3: Waardes orthotrope stijfheidsmatrix

# lagen	Plaatdikte mm	Buiging			Afschuif			Axiaal			
		D11 Nm ² /m	D22 Nm ² /m	D12 Nm ² /m	D33 Nm ² /m	D44 N/m	D55 N/m	D66 N/m	D77 N/m	D67 N/m	D88 N/m
3	60	1,88E+05	7,33E+03	0,00E+00	8,07E+03	4,66E+06	9,96E+06	4,40E+08	2,20E+08	0,00E+00	3,11E+07
3	120	1,44E+06	5,87E+04	0,00E+00	6,46E+04	1,13E+07	1,99E+07	8,80E+08	4,40E+08	0,00E+00	6,21E+07
5	160	3,15E+06	3,98E+05	0,00E+00	1,53E+05	1,86E+07	4,06E+06	1,32E+09	4,40E+08	0,00E+00	8,28E+07
5	200	5,16E+06	1,44E+06	0,00E+00	2,99E+05	1,68E+07	8,39E+06	1,32E+09	8,80E+08	0,00E+00	1,04E+08
7	280	1,45E+07	5,86E+06	0,00E+00	8,20E+05	2,85E+07	1,61E+07	1,76E+09	1,32E+09	0,00E+00	1,45E+08
9	360	2,89E+07	1,45E+07	0,00E+00	1,74E+06	3,65E+07	2,70E+07	2,20E+09	1,76E+09	0,00E+00	1,86E+08



Bewijs lineair verband tijdsignaal frequentie spectrum

In deze Bijlage is het lineaire verband aangetoond van het tijdsignaal en het frequentiespectrum van de gemeten kwadratische trillingssterkte. Met dit bewijs wordt de methode gevalideerd waarbij een gemeten treinsignaal met een factor is verhoogd.

Om een lineair verband aan te tonen zijn de definities van de Fourier transformatie en het kwadratisch gemiddelde beschreven in Vergelijkingen (E.1) en (E.4). Vervolgens is in beide vergelijkingen de functie $af(t)$ gesubstitueerd. Deze functie staat voor het originele tijdsignaal vermenigvuldigd met een factor a .

Bij de definitie van de Fourier transformatie in Vergelijking E.2 is te zien dat de factor a een lineair verband heeft met de rest van de termen binnen de integraal, daarom mag deze factor buiten de integraal worden gehaald. Het resultaat is weergegeven in Vergelijking (E.3), hieruit is het lineaire verband direct zichtbaar.

Dezelfde stappen zijn doorgelopen voor de definitie van het kwadratische gemiddelde. Echter, is de factor binnen de integraal eerste gekwadrateerd. Maar deze factor is niet tijdsafhankelijk en daarom mag deze buiten de integraal worden gehaald. Door vervolgens de wortel te nemen van de kwadratische factor, valt de factor buiten het wortelteken. Deze twee stappen zijn weergegeven in Vergelijking (E.5). Door (E.4) in (E.5) te substitueren wordt Vergelijking (E.6) verkregen en is het lineaire verband aangetoond.

$$\hat{f}(\varepsilon) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i2\pi\varepsilon t} dt \quad (\text{E.1})$$

$$\hat{f}(\varepsilon)_a = \int_{-\infty}^{\infty} af(t)e^{-i2\pi\varepsilon t} dt = a\hat{f}(\varepsilon) \quad (\text{E.2})$$

$$\hat{f}(\varepsilon)_a = a\hat{f}(\varepsilon) \quad (\text{E.3})$$

$$f_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} f(t)^2 dt} \quad (\text{E.4})$$

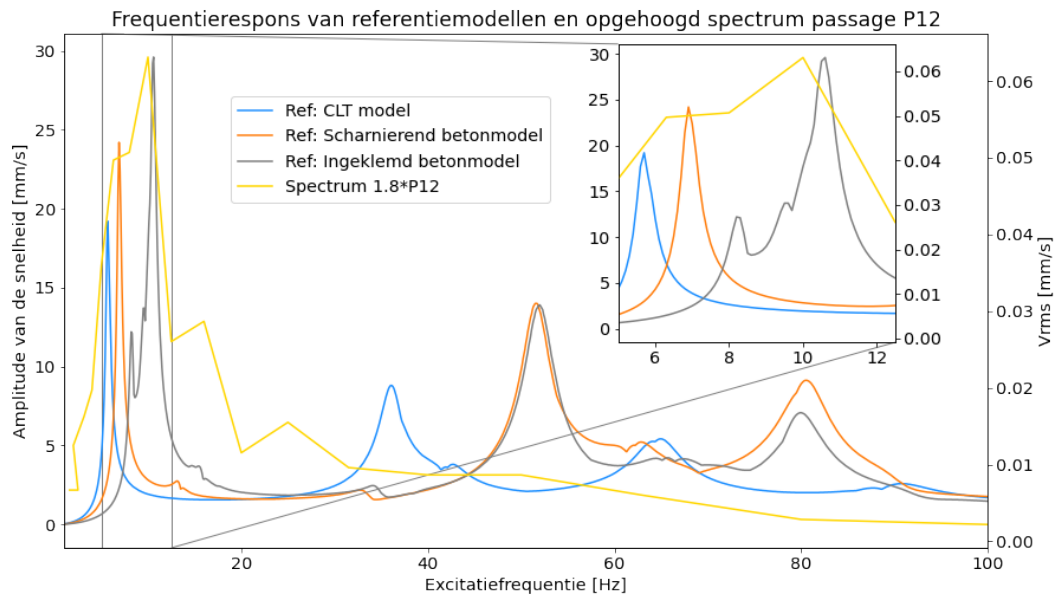
$$f_{RMS,a} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} (af(t))^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} a^2 \int_{T_1}^{T_2} f(t)^2 dt} = a \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} f(t)^2 dt} \quad (\text{E.5})$$

$$f_{RMS,a} = af_{RMS} \quad (\text{E.6})$$

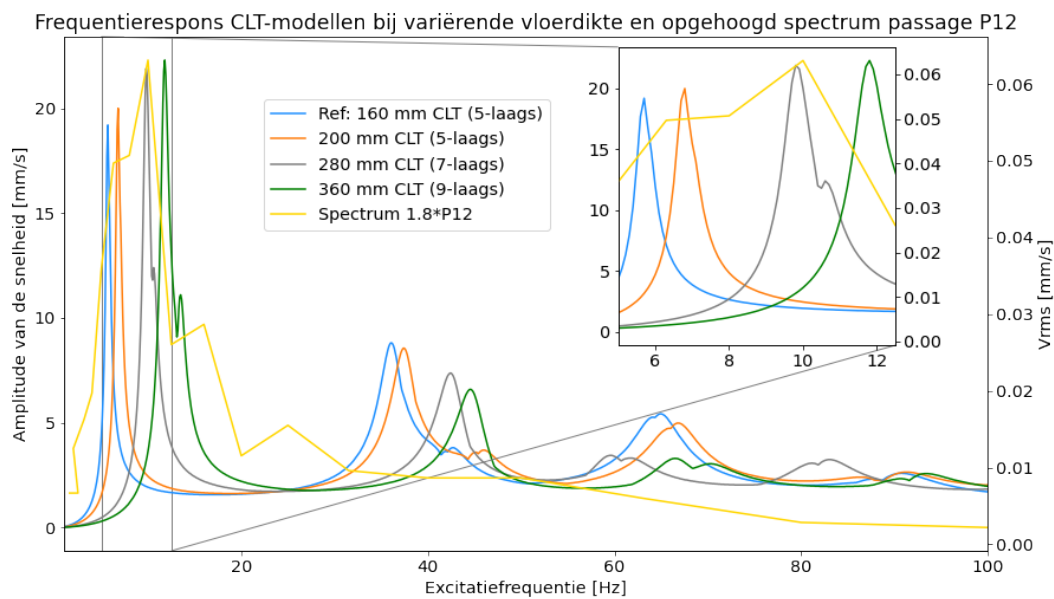
De relatie van de Fourier transformatie en het kwadratische gemiddelde lineair is met de functie $af(t)$. Dit betekent dat het substitueren van Vergelijking (E.5) in Vergelijking (E.1) ook resulteert in een lineair verband. Hiermee is aangetoond dat het verhogen van het tijdsignaal resulteert in een evenredige verhoging van het frequentiespectrum van het kwadratische gemiddelde van de trillingsterkte.

Figuren voorspellen trillingshinder

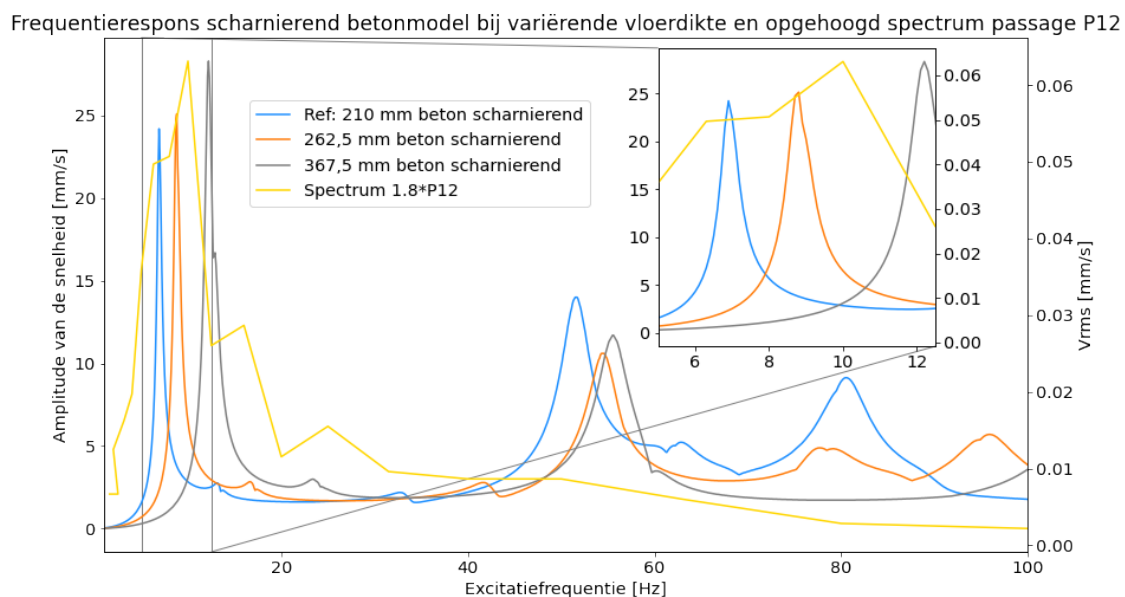
In deze paragraaf zijn de frequentierespons van de referentiemodellen en de modellen met de ontwerpmaatregelen weergegeven.



Figuur F.1: Voorspelling trillingshinder van referentiemodellen

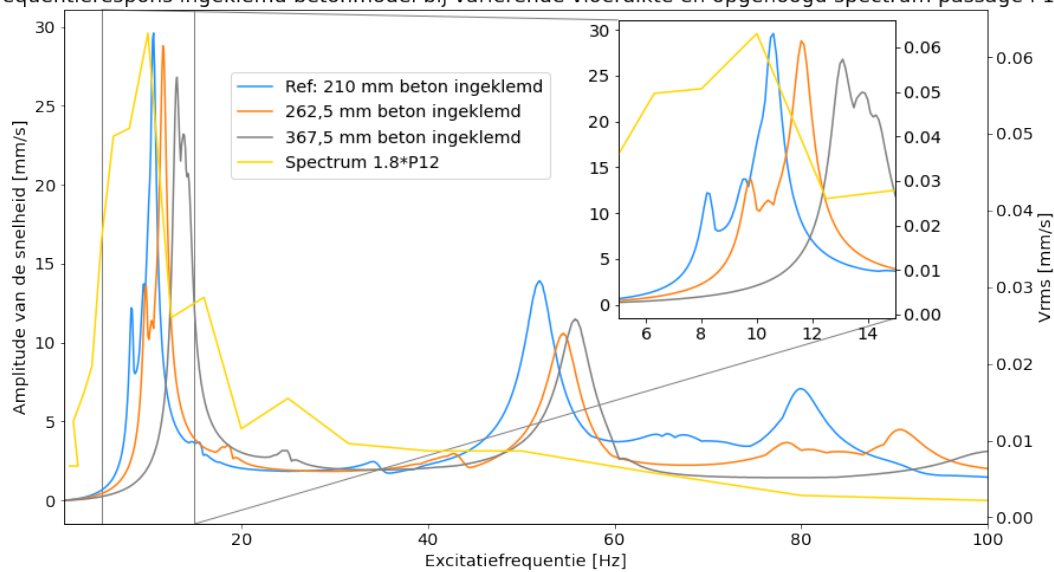


Figuur F.2: Voorspelling trillingshinder van ontwerpmaatregel variërende vloerdikte bij CLT-model

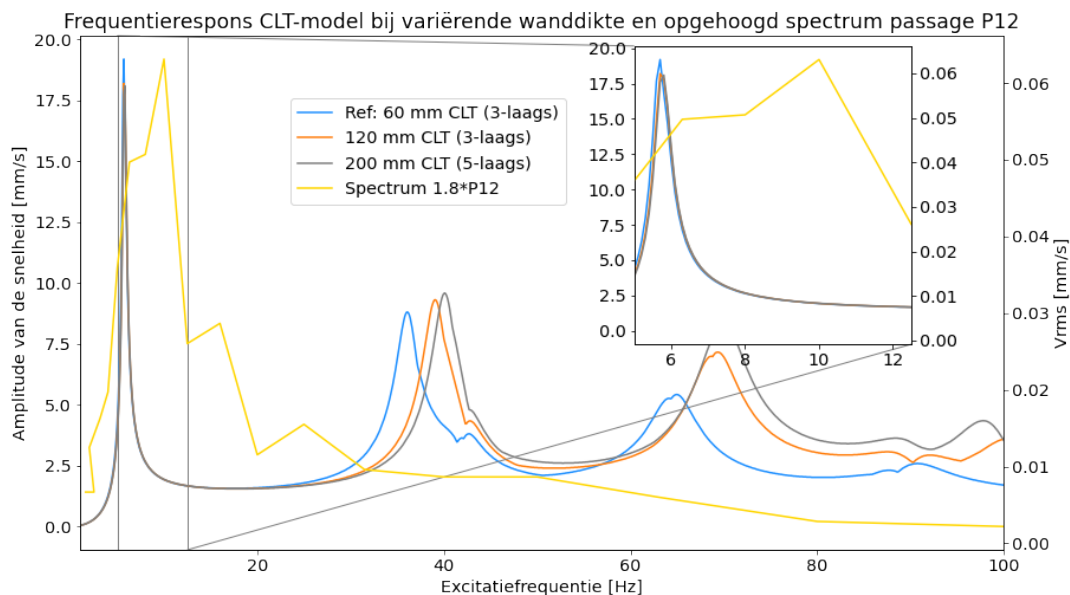


Figuur F.3: Voorspelling trillingshinder van ontwerpmaatregel variërende vloerdikte bij scharnierend betonmodel

Frequentierespons ingeklemd betonmodel bij variërende vloerdikte en opgehoogd spectrum passage P12

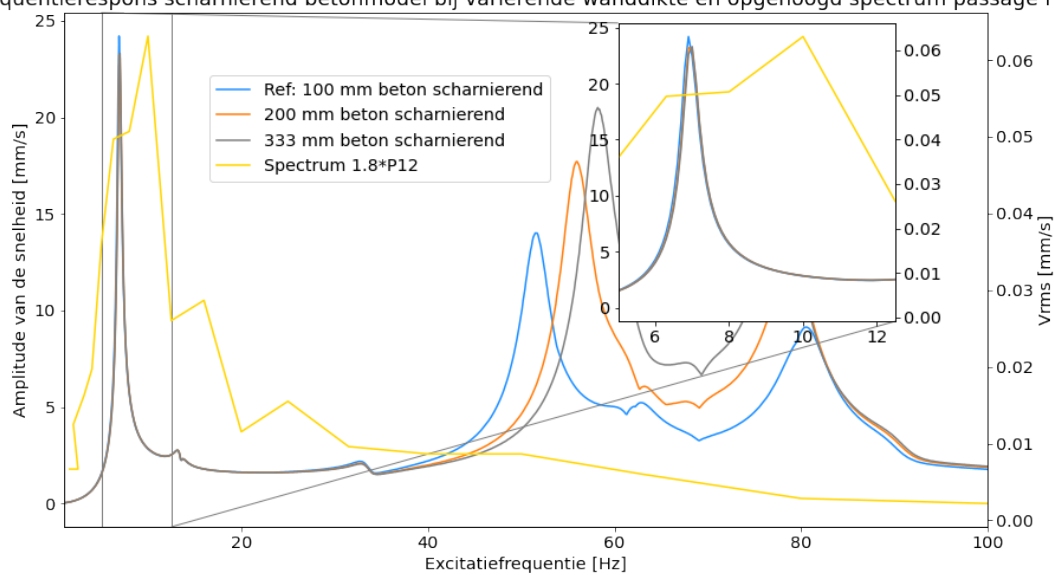


Figuur F.4: Voorspelling trillingshinder van ontwerpmaatregel variërende vloerdikte bij ingeklemd betonmodel



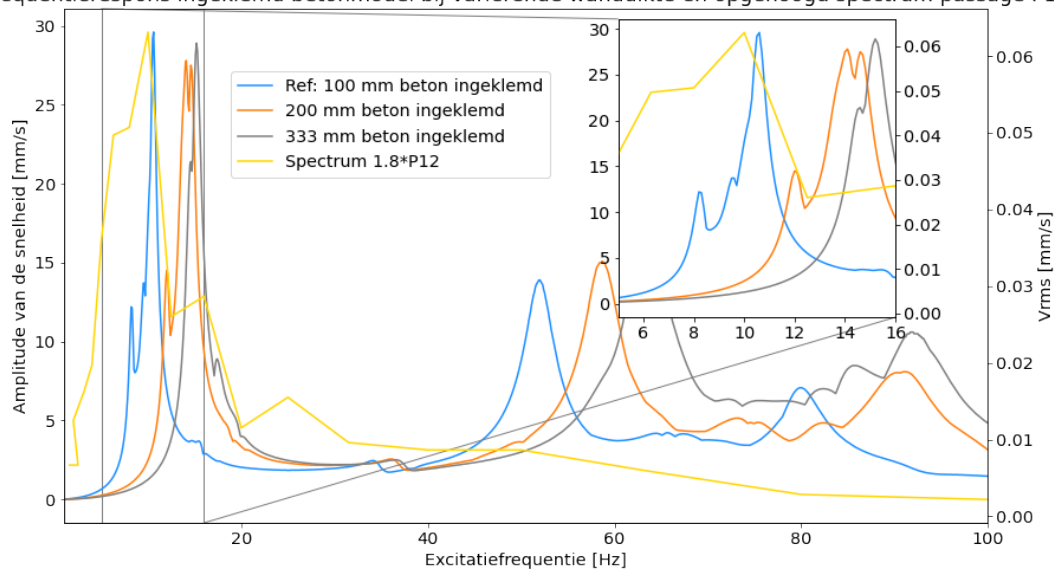
Figuur F.5: Voorspelling trillingshinder van ontwerpmaatregel variërende wanddikte bij CLT-model

Frequentierespons scharnierend betonmodel bij variërende wanddikte en opgehoogd spectrum passage P12

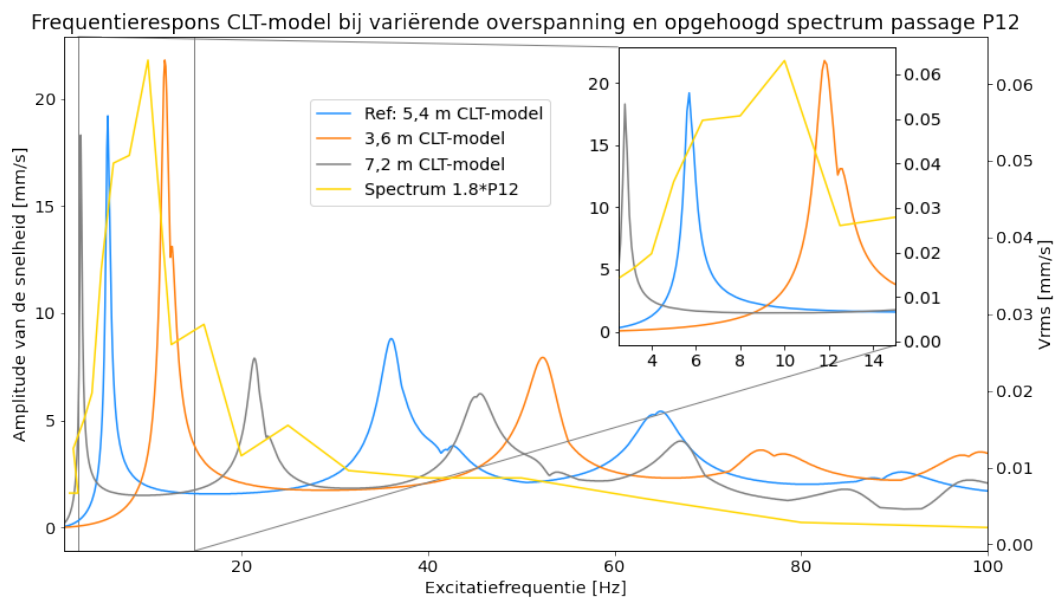


Figuur F.6: Voorspelling trillingshinder van ontwerpmaatregel variërende wanddikte bij scharnierend betonmodel

Frequentierespons ingeklemd betonmodel bij variërende wanddikte en opgehoogd spectrum passage P12

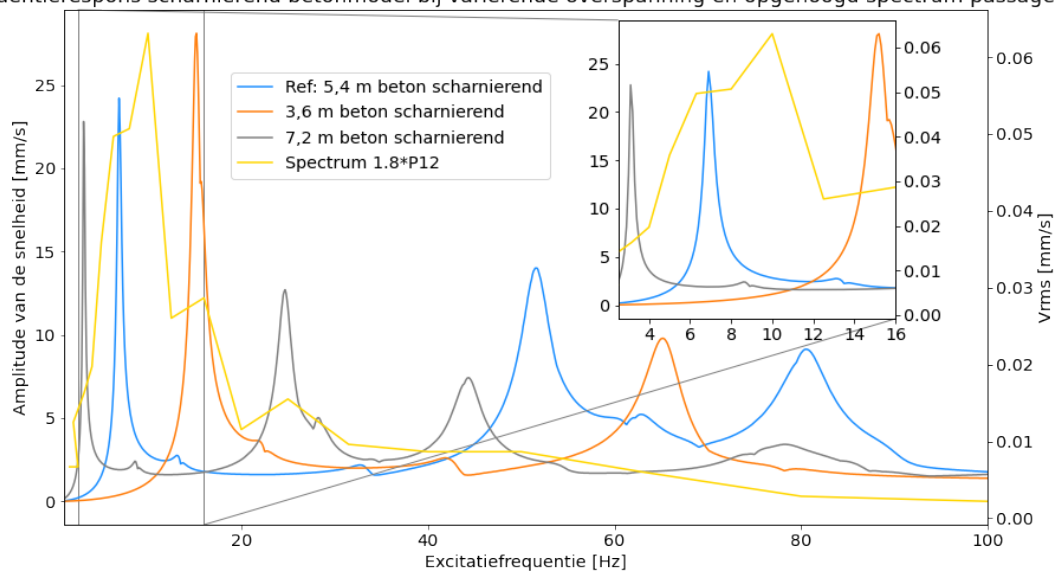


Figuur F.7: Voorspelling trillingshinder van ontwerpmaatregel variërende wanddikte bij ingeklemd betonmodel



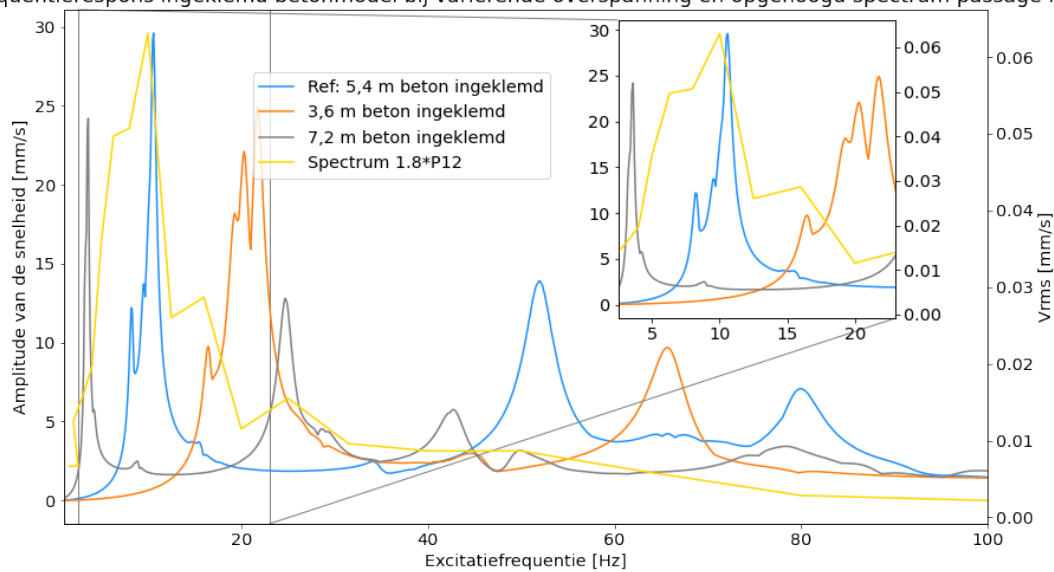
Figuur F.8: Voorspelling trillingshinder van ontwerpmaatregel variërende overspanning bij CLT-model

Frequentierespons scharnierend betonmodel bij variërende overspanning en opgehoogd spectrum passage P12



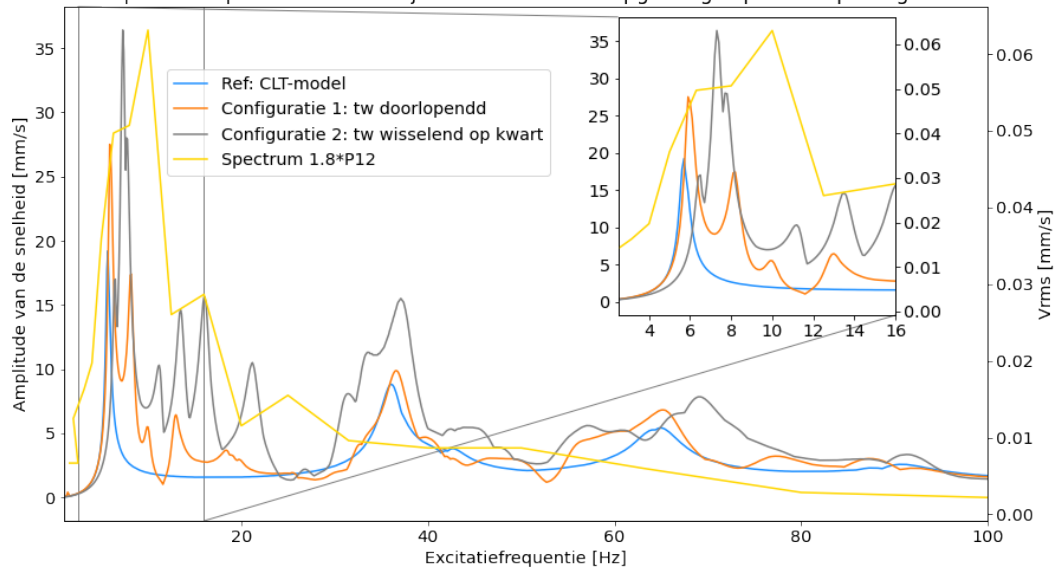
Figuur F.9: Voorspelling trillingshinder van ontwerpmaatregel variërende overspanning bij scharnierend betonmodel

Frequentierespons ingeklemd betonmodel bij variërende overspanning en opgehoogd spectrum passage P12



Figuur F.10: Voorspelling trillingshinder van ontwerpmaatregel variërende overspanning bij ingeklemd betonmodel

Frequentierespons CLT-model bij tussenwanden en opgehoogd spectrum passage P12



Figuur F.11: Voorspelling trillingshinder van ontwerpmaatregel tussenwanden bij CLT-model



Resultaten LTHA

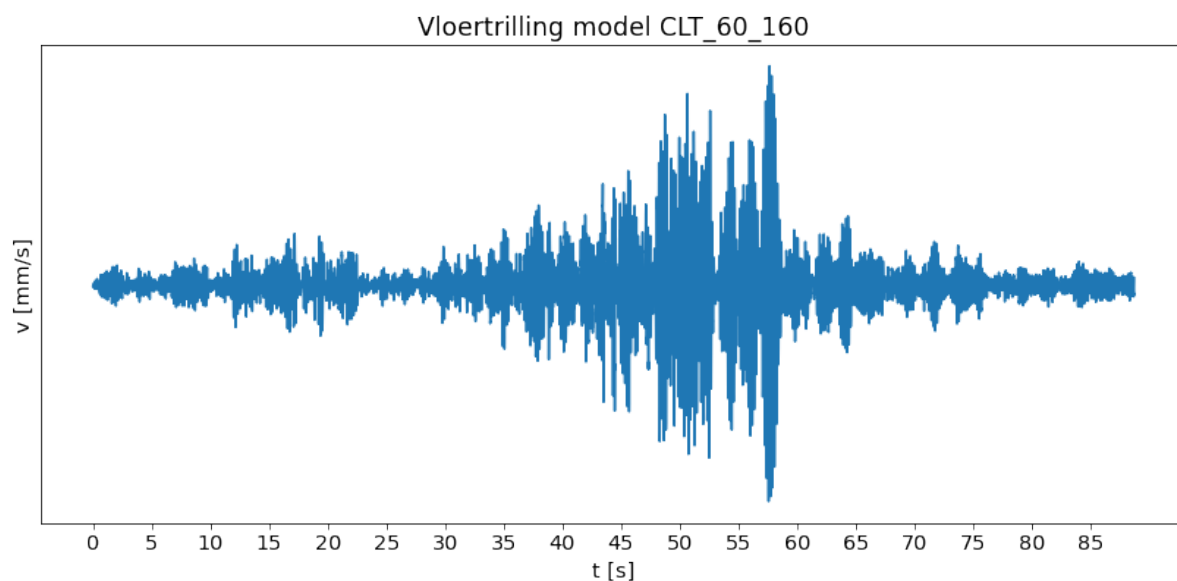
In deze bijlage zijn de resultaten getoond waarmee de maximale voortschrijdende waarde is bepaald die benodigd is voor de toetsing op trillingshinder. Hierbij zijn ook de relevante tussenstappen weergegeven. Deze tussenstappen bestaan uit de vloertrilling afkomstig uit het lineaire tijdsafhankelijke analyse, de Fourier transformatie van de vloertrilling en de grafiek van de voortschrijdende effectieve waarde in verloop van tijd. Tot slot wordt de maximale voortschrijdende waarde van de grafiek getoond. Deze waarde dient gebruikt te worden voor de toetsing aan de SBR.

G.1. Referentie modellen

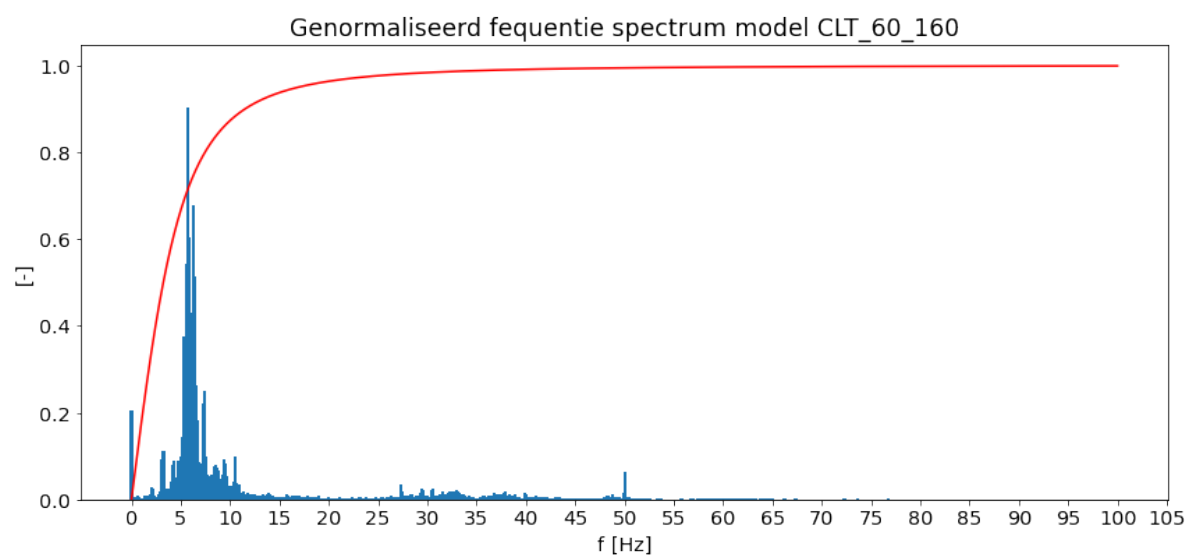
In deze sectie zijn de resultaten voor de toetsing van trillingshinder voor de referentiemodellen weergegeven.

CLT model

De vloertrilling van het CLT-referentiemodel is weergegeven in Figuur G.1. Deze vloertrilling is getransformeerd middels de Fourier transformatie naar het frequentiedomein. In Figuur G.2 is de genormaliseerde Fourier transformatie getoond. De rode lijn representeert de weegfunctie vanuit de SBR. Na het toepassen van de weegfunctie en het terug transformeren, is het gewogen kwadratische gemiddelde toegepast voor het verkrijgen van de voortschrijdende effectieve waarde, zoals in Figuur G.3 getoond. De maximale waarde V_{max} bedraagt 0,55.



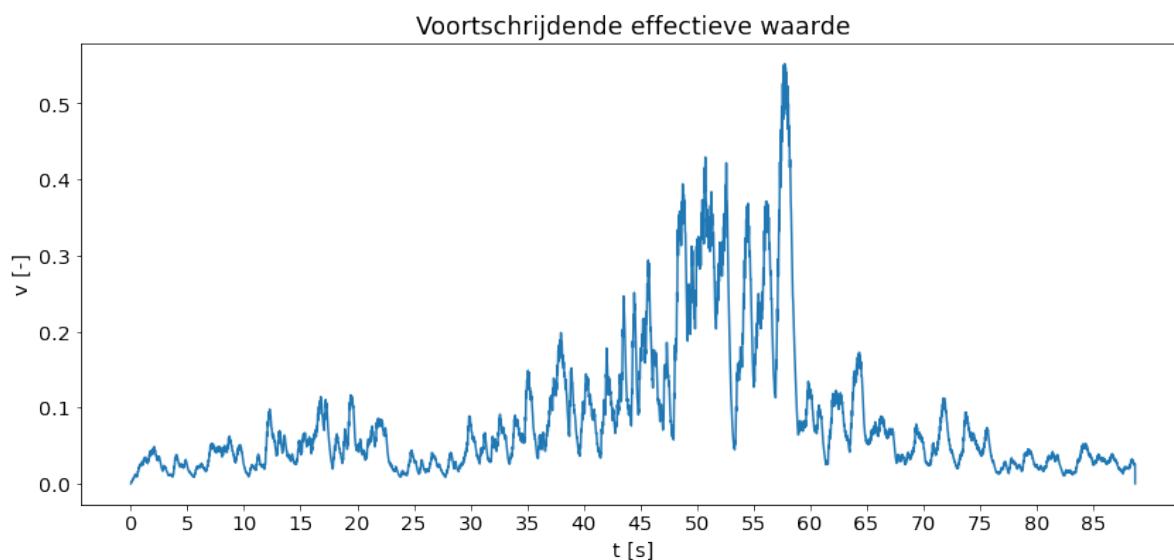
Figuur G.1: Vloertrilling CLT referentie model



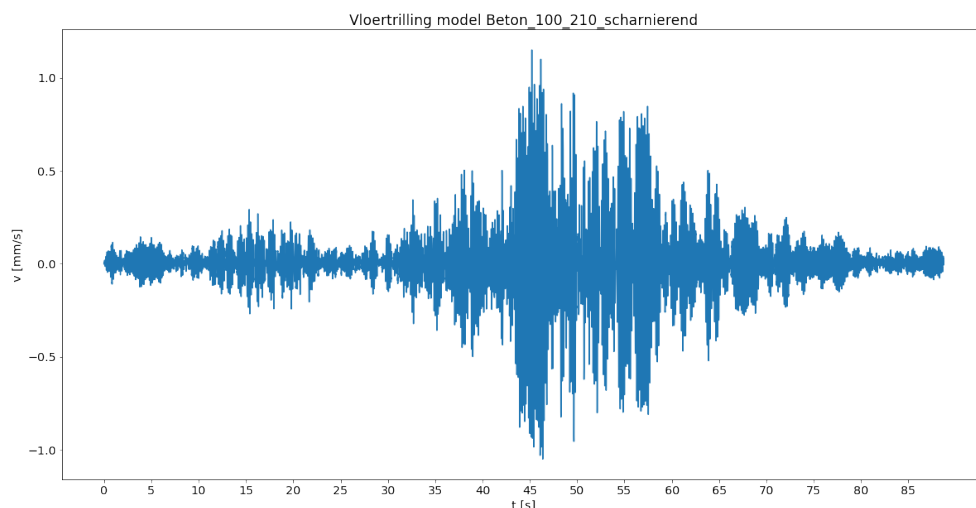
Figuur G.2: FFT CLT referentie model

Scharnierend betonmodel

De vloertrilling van het scharnierende betonmodel is weergegeven in Figuur G.4. Deze vloertrilling is getransformeerd middels de Fourier transformatie naar het frequentiedomein. In Figuur G.38 is de genormaliseerde Fourier transformatie getoond. De rode lijn representeert de weegfunctie vanuit de SBR. Na het toepassen van de weegfunctie en het terug transformeren, is het gewogen kwadratische gemiddelde toegepast voor het verkrijgen van de voortschrijdende effectieve waarde, zoals in Figuur G.6 getoond. De maximale waarde V_{max} bedraagt 0,68.



Figuur G.3: V_{eff} CLT referentie model



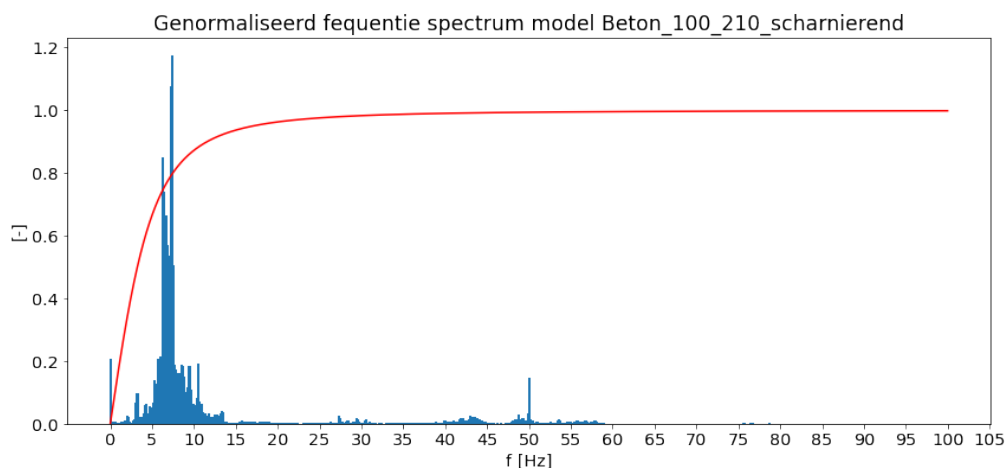
Figuur G.4: Vloertrilling referentie scharnierend betonmodel

Ingeklemd betonmodel

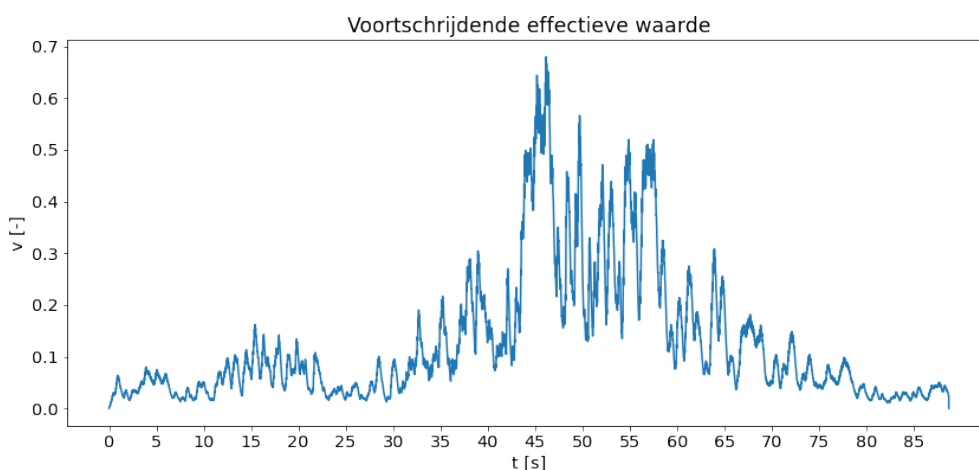
De vloertrilling van het ingeklemd betonmodel is weergegeven in Figuur G.7. Deze vloertrilling is getransformeerd middels de Fourier transformatie naar het frequentiedomein. In Figuur G.8 is de genormaliseerde Fourier transformatie getoond. De rode lijn representeert de weegfunctie vanuit de SBR. Na het toepassen van de weegfunctie en het terug transformeren, is het gewogen kwadratische gemiddelde toegepast voor het verkrijgen van de voortschrijdende effectieve waarde, zoals in Figuur G.9 getoond. De maximale waarde V_{max} bedraagt 1,35.

G.2. Ontwerpmaatregelen

In deze sectie zijn de maximale voortschrijdende waarden bepaald van de modellen waarbij ontwerpmaatregel van toepassing zijn.



Figuur G.5: FFT referentie scharnierend betonmodel

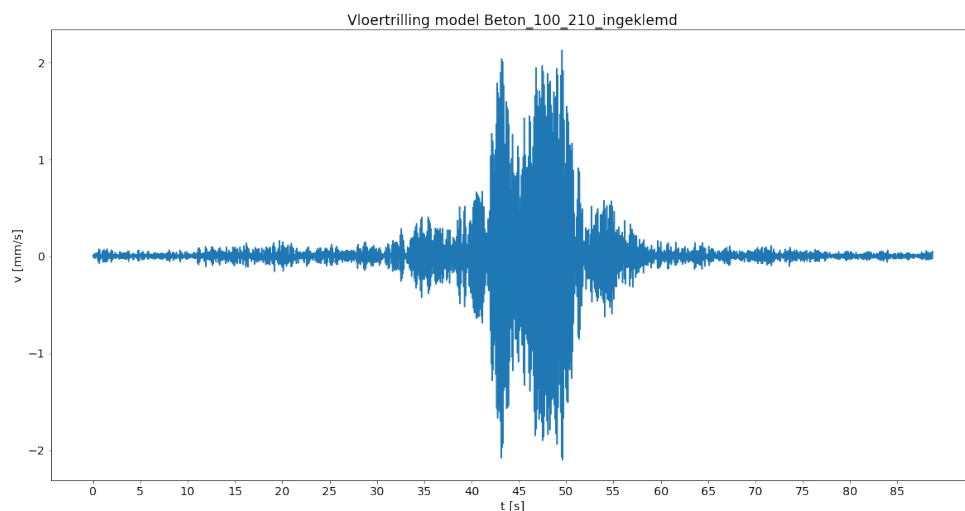


Figuur G.6: V_{eff} scharnierend betonmodel

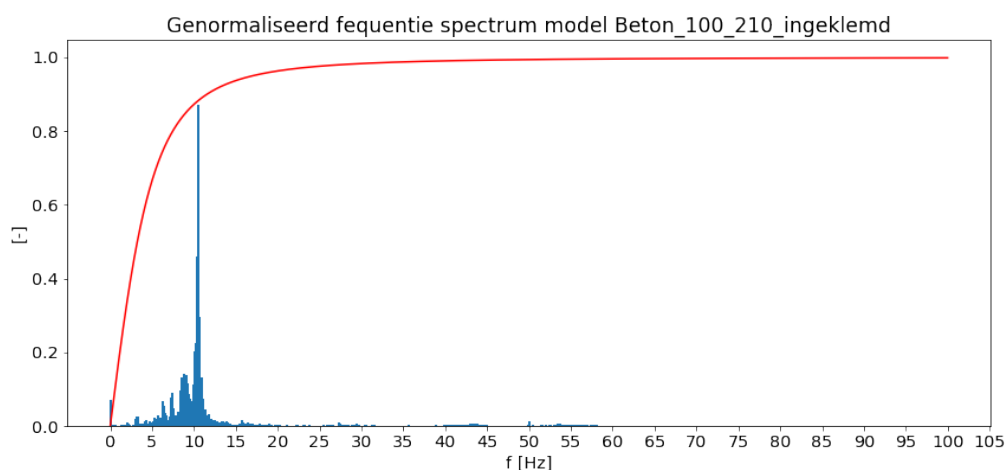
G.2.1. Vloerdikte

CLT vloer 200 mm

De vloertrilling van het CLT-model met een vloerdikte van 200 mm is weergegeven in Figuur G.10. Deze vloertrilling is getransformeerd middels de Fourier transformatie naar het frequentiedomein. In Figuur G.11 is de genormaliseerde Fourier transformatie getoond. De rode lijn representeert de weegfunctie vanuit de SBR. Na het toepassen van de weegfunctie en het terug transformeren, is het gewogen kwadratische gemiddelde toegepast voor het verkrijgen van de voortschrijdende effectieve waarde, zoals in Figuur G.12 getoond. De maximale waarde V_{max} bedraagt 0,55.



Figuur G.7: Vloertrilling referentie ingeklemd betonmodel



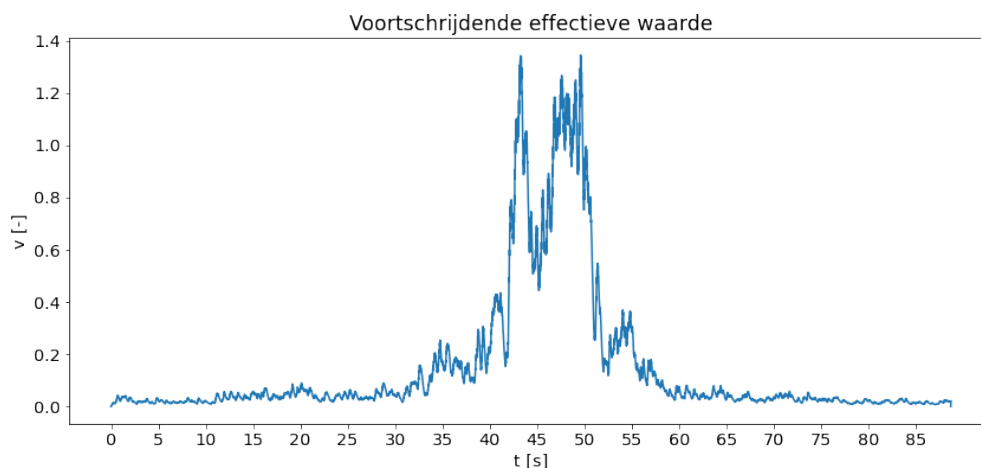
Figuur G.8: FFT referentie ingeklemd betonmodel

CLT vloer 280 mm

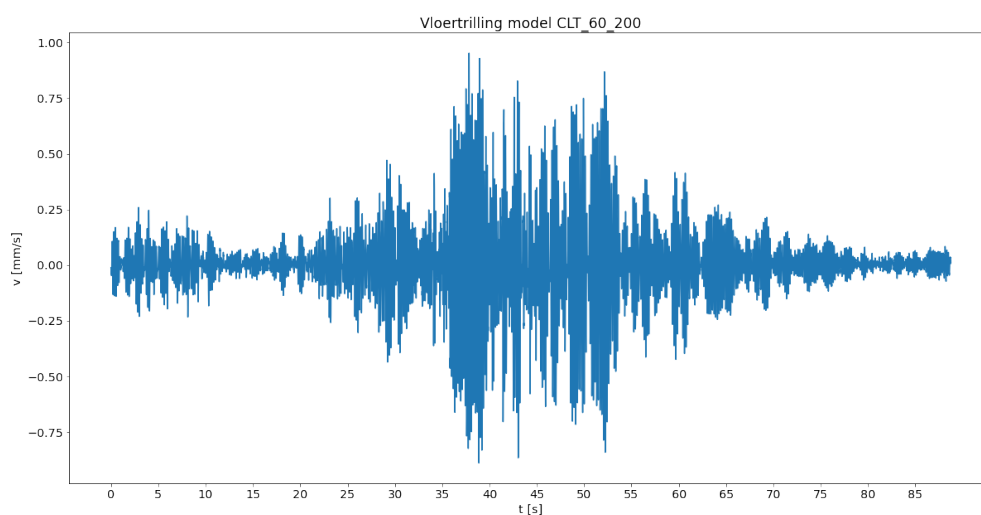
De vloertrilling van het CLT-model met een vloerdikte van 280 mm is weergegeven in Figuur G.13. Deze vloertrilling is getransformeerd middels de Fourier transformatie naar het frequentiedomein. In Figuur G.14 is de genormaliseerde Fourier transformatie getoond. De rode lijn representeert de weegfunctie vanuit de SBR. Na het toepassen van de weegfunctie en het terug transformeren, is het gewogen kwadratische gemiddelde toegepast voor het verkrijgen van de voortschrijdende effectieve waarde, zoals in Figuur G.15 getoond. De maximale waarde V_{max} bedraagt 1,30.

CLT vloer 360 mm

De vloertrilling van het CLT-model met een vloerdikte van 360 mm is weergegeven in Figuur G.16. Deze vloertrilling is getransformeerd middels de Fourier transformatie naar het frequentiedomein. In Figuur G.17 is de genormaliseerde Fourier transformatie getoond. De rode lijn representeert de weegfunctie vanuit de SBR. Na het toepassen van de weegfunctie en het te-



Figuur G.9: V_{eff} ingeklemd betonmodel

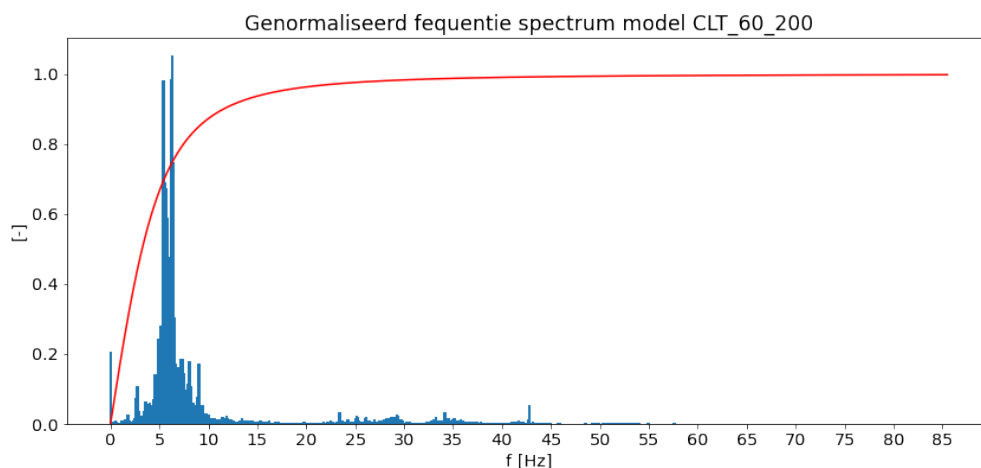


Figuur G.10: Vloertrilling CLT model vloer 200 mm

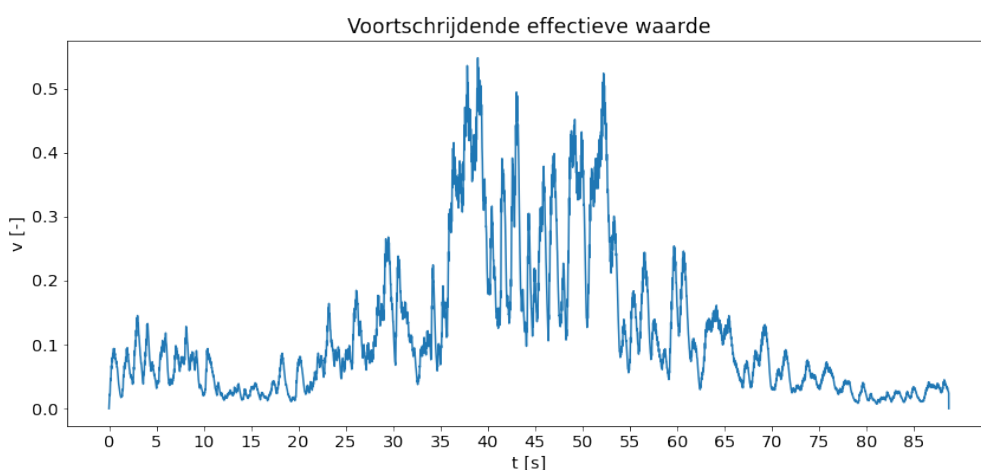
rug transformeren, is het gewogen kwadratische gemiddelde toegepast voor het verkrijgen van de voortschrijdende effectieve waarde, zoals in Figuur G.18 getoond. De maximale waarde V_{max} bedraagt 0,98.

Scharnierende betonvloer 262,5 mm

De vloertrilling van het scharnierende betonmodel met een vloerdikte van 262,5 mm is weergegeven in Figuur G.19. Deze vloertrilling is getransformeerd middels de Fourier transformatie naar het frequentiedomein. In Figuur G.20 is de genormaliseerde Fourier transformatie getoond. De rode lijn representeert de weegfunctie vanuit de SBR. Na het toepassen van de weegfunctie en het terug transformeren, is het gewogen kwadratische gemiddelde toegepast voor het verkrijgen van de voortschrijdende effectieve waarde, zoals in Figuur G.21 getoond. De maximale waarde V_{max} bedraagt 0,61.



Figuur G.11: FFT CLT model vloer 200 mm

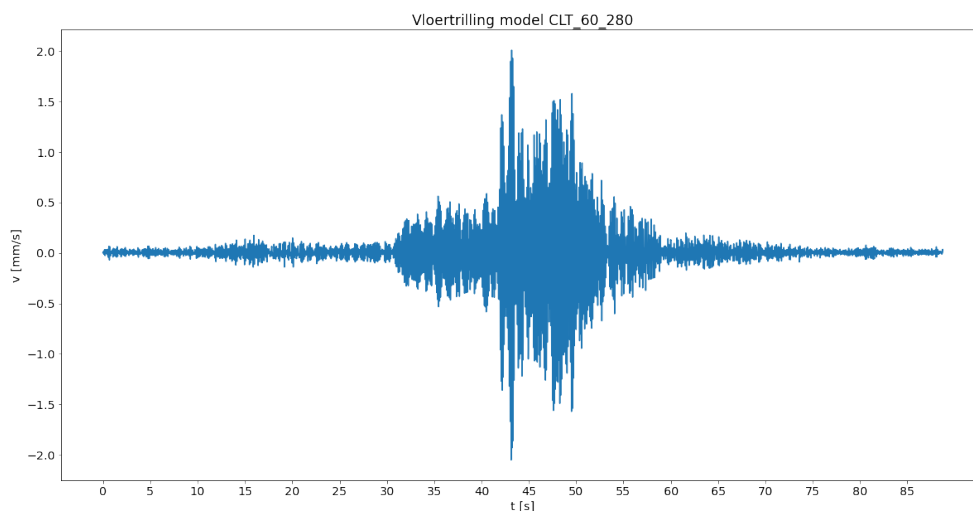
Figuur G.12: V_{eff} CLT model vloer 200 mm

Scharnierende betonvloer 367,5 mm

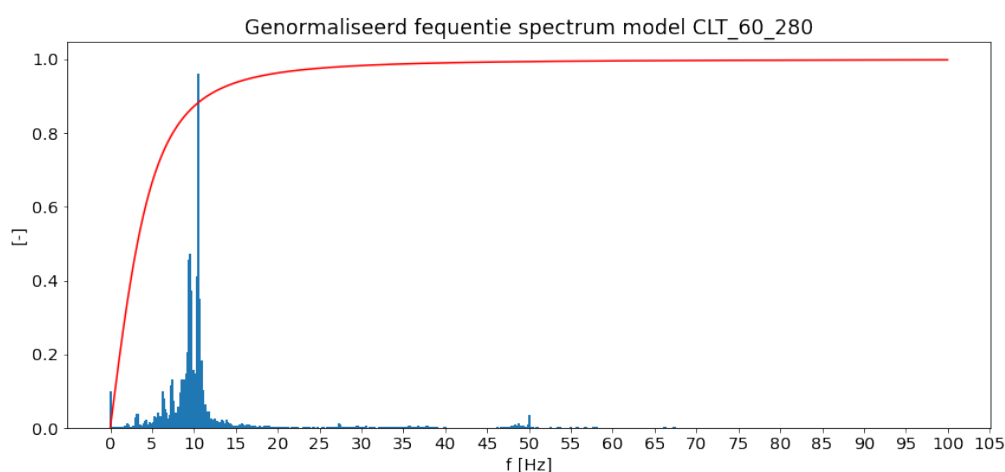
De vloertrilling van het scharnierende betonmodel met een vloerdikte van 367,5 mm is weergegeven in Figuur G.22. Deze vloertrilling is getransformeerd middels de Fourier transformatie naar het frequentiedomein. In Figuur G.23 is de genormaliseerde Fourier transformatie getoond. De rode lijn representeert de weegfunctie vanuit de SBR. Na het toepassen van de weegfunctie en het terug transformeren, is het gewogen kwadratische gemiddelde toegepast voor het verkrijgen van de voortschrijdende effectieve waarde, zoals in Figuur G.24 getoond. De maximale waarde V_{max} bedraagt 1,08.

Ingeklemd betonvloer 262,5 mm

De vloertrilling van het ingeklemde betonmodel met een vloerdikte van 262,5 mm is weergegeven in Figuur G.25. Deze vloertrilling is getransformeerd middels de Fourier transformatie naar het frequentiedomein. In Figuur G.26 is de genormaliseerde Fourier transformatie getoond. De rode lijn representeert de weegfunctie vanuit de SBR. Na het toepassen van de weegfunctie en het terug transformeren, is het gewogen kwadratische gemiddelde toegepast voor het verkrijgen van de voortschrijdende effectieve waarde, zoals in Figuur G.30 getoond.



Figuur G.13: Vloertrilling CLT model vloer 280 mm



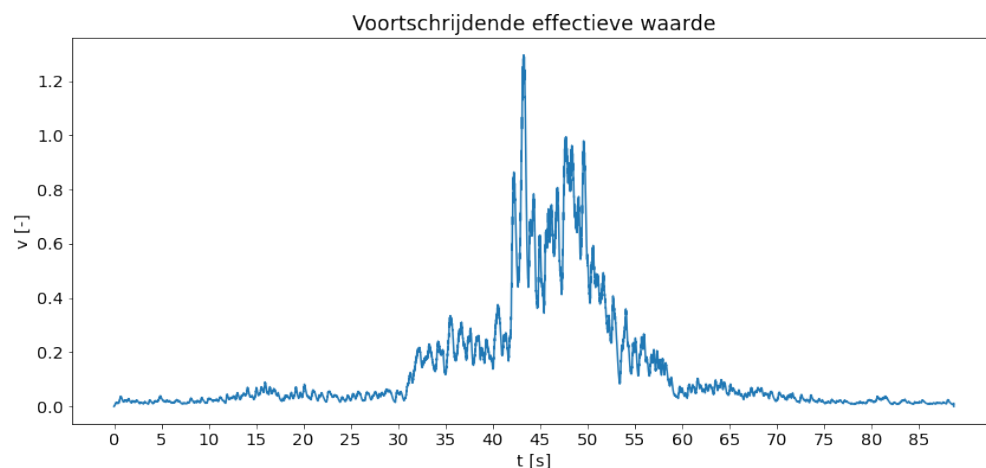
Figuur G.14: FFT CLT model vloer 280 mm

De maximale waarde V_{max} bedraagt 1,42.

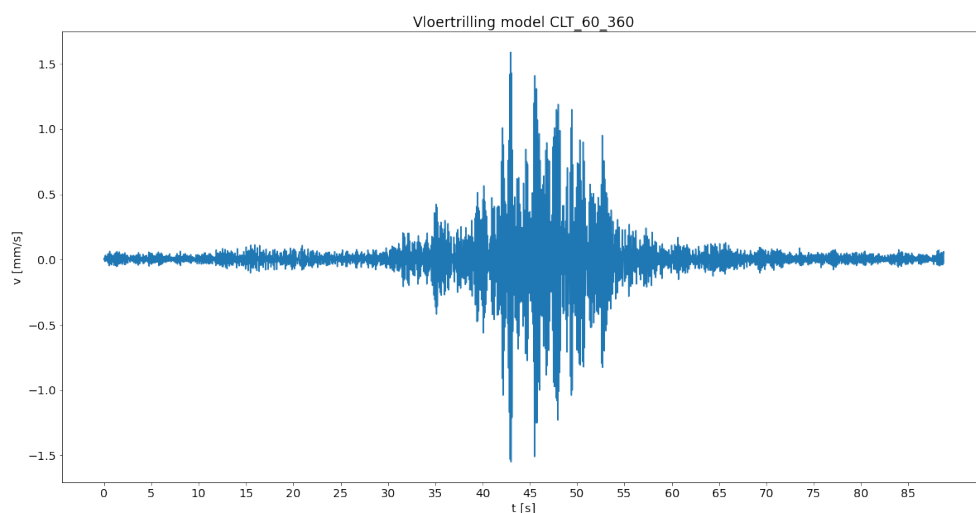
Ingeklemd betonvloer 367,5 mm

De vloertrilling van het ingeklemde betonmodel met een vloerdikte van 367,5 mm is weergegeven in Figuur G.28. Deze vloertrilling is getransformeerd middels de Fourier transformatie naar het frequentiedomein. In Figuur G.29 is de genormaliseerde Fourier transformatie getoond. De rode lijn representeert de weegfunctie vanuit de SBR. Na het toepassen van de weegfunctie en het terug transformeren, is het gewogen kwadratische gemiddelde toegepast voor het verkrijgen van de voortschrijdende effectieve waarde, zoals in Figuur G.30 getoond. De maximale waarde V_{max} bedraagt 0,80.

G.2.2. Wanddikte



Figuur G.15: V_{eff} CLT model vloer 280 mm



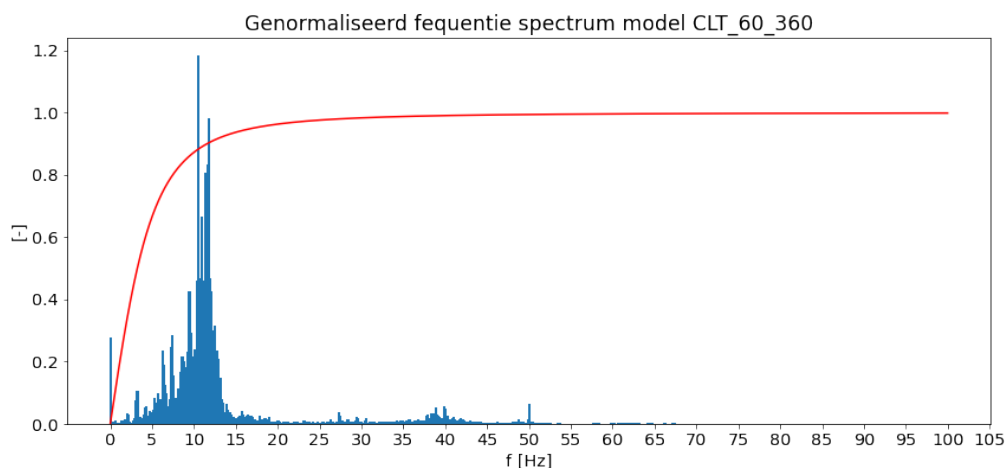
Figuur G.16: Vloertrilling CLT model vloer 360 mm

CLT wand 120 mm

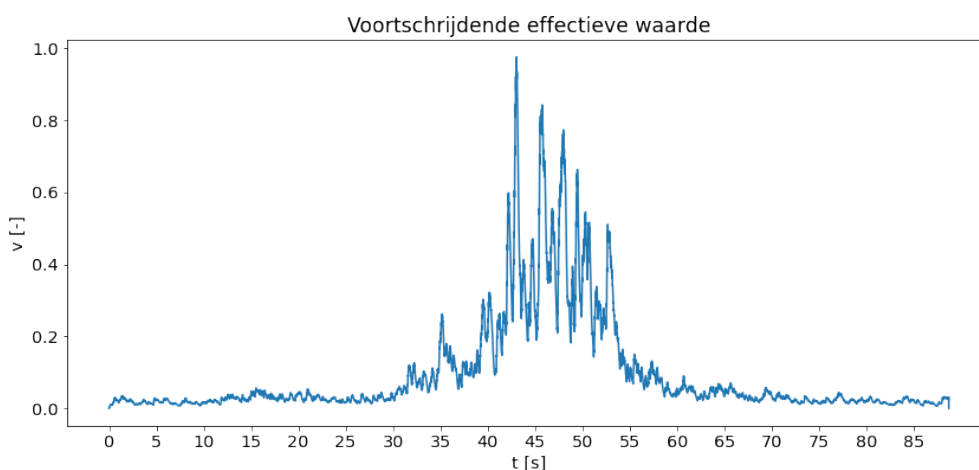
De vloertrilling van het CLT-model met een wanddikte van 120 mm is weergegeven in Figuur G.31. Deze vloertrilling is getransformeerd middels de Fourier transformatie naar het frequentiedomein. In Figuur G.32 is de genormaliseerde Fourier transformatie getoond. De rode lijn representeert de weegfunctie vanuit de SBR. Na het toepassen van de weegfunctie en het terug transformeren, is het gewogen kwadratische gemiddelde toegepast voor het verkrijgen van de voortschrijdende effectieve waarde, zoals in Figuur G.33 getoond. De maximale waarde V_{max} bedraagt 0,58.

CLT vloer 200 mm

De vloertrilling van het CLT-model met een wanddikte van 200 mm is weergegeven in Figuur G.34. Deze vloertrilling is getransformeerd middels de Fourier transformatie naar het frequentiedomein. In Figuur G.35 is de genormaliseerde Fourier transformatie getoond. De rode lijn representeert de weegfunctie vanuit de SBR. Na het toepassen van de weegfunctie en het te-



Figuur G.17: FFT CLT model vloer 360 mm



Figuur G.18: V_{eff} CLT model vloer 360 mm

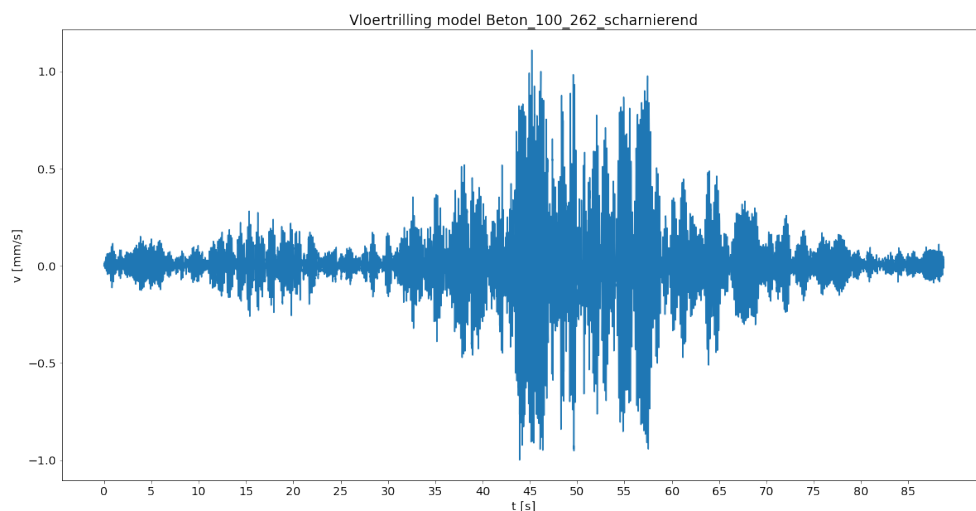
rug transformeren, is het gewogen kwadratische gemiddelde toegepast voor het verkrijgen van de voortschrijdende effectieve waarde, zoals in Figuur G.36 getoond. De maximale waarde V_{max} bedraagt 0,58.

Scharnierende betonwand 200 mm

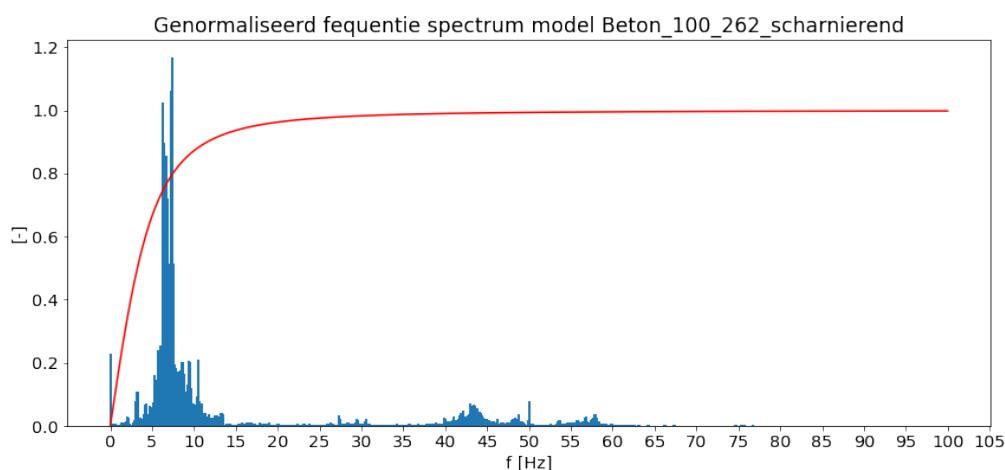
De vloertrilling van het scharnierende betonmodel met een wanddikte van 200 mm is weergegeven in Figuur G.37. Deze vloertrilling is getransformeerd middels de Fourier transformatie naar het frequentiedomein. In Figuur G.38 is de genormaliseerde Fourier transformatie getoond. De rode lijn representeert de weegfunctie vanuit de SBR. Na het toepassen van de weegfunctie en het terug transformeren, is het gewogen kwadratische gemiddelde toegepast voor het verkrijgen van de voortschrijdende effectieve waarde, zoals in Figuur G.39 getoond. De maximale waarde V_{max} bedraagt 0,67.

Scharnierende betonwand 333 mm

De vloertrilling van het scharnierende betonmodel met een wanddikte van 333 mm is weergegeven in Figuur G.40. Deze vloertrilling is getransformeerd middels de Fourier transformatie



Figuur G.19: Vloertrilling scharnierend betonmodel vloer 262,5 mm

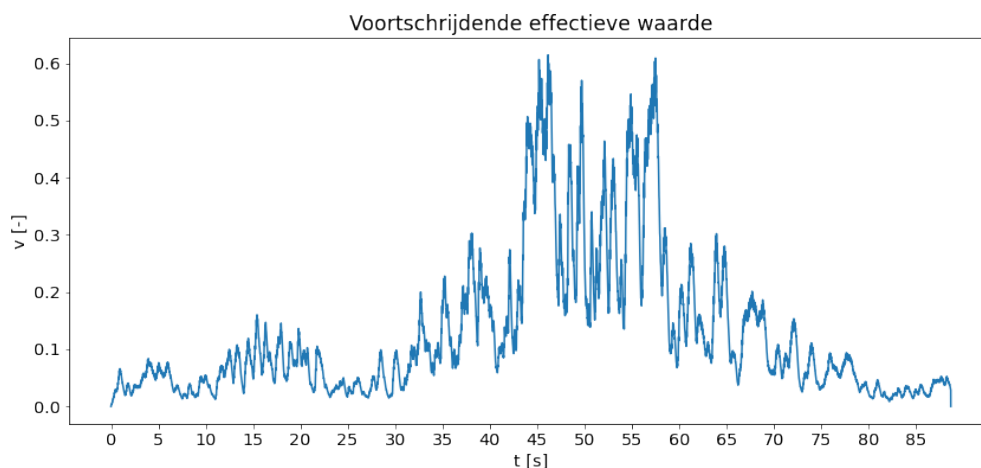


Figuur G.20: FFT scharnierend betonmodel vloer 262,5 mm

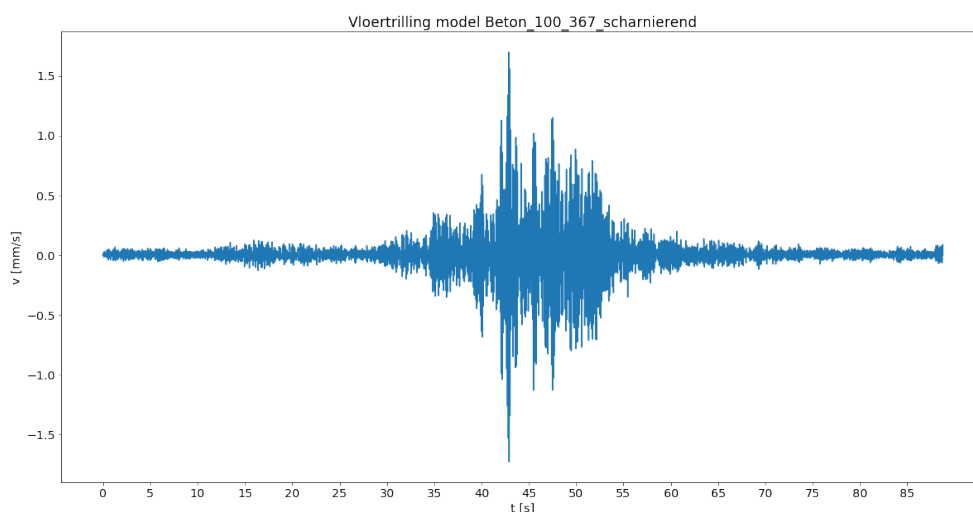
naar het frequentiedomein. In Figuur G.41 is de genormaliseerde Fourier transformatie getoond. De rode lijn representeert de weegfunctie vanuit de SBR. Na het toepassen van de weegfunctie en het terug transformeren, is het gewogen kwadratische gemiddelde toegepast voor het verkrijgen van de voortschrijdende effectieve waarde, zoals in Figuur G.42 getoond. De maximale waarde V_{max} bedraagt 0,61.

Ingeklemd betonwand 200 mm

De vloertrilling van het ingeklemde betonmodel met een wanddikte van 200 mm is weergegeven in Figuur G.43. Deze vloertrilling is getransformeerd middels de Fourier transformatie naar het frequentiedomein. In Figuur G.44 is de genormaliseerde Fourier transformatie getoond. De rode lijn representeert de weegfunctie vanuit de SBR. Na het toepassen van de weegfunctie en het terug transformeren, is het gewogen kwadratische gemiddelde toegepast voor het verkrijgen van de voortschrijdende effectieve waarde, zoals in Figuur G.45 getoond. De maximale waarde V_{max} bedraagt 0,91.



Figuur G.21: V_{eff} scharnierende betonmodel vloer 262,5 mm



Figuur G.22: Vloertrilling scharnierend betonmodel vloer 367,5 mm

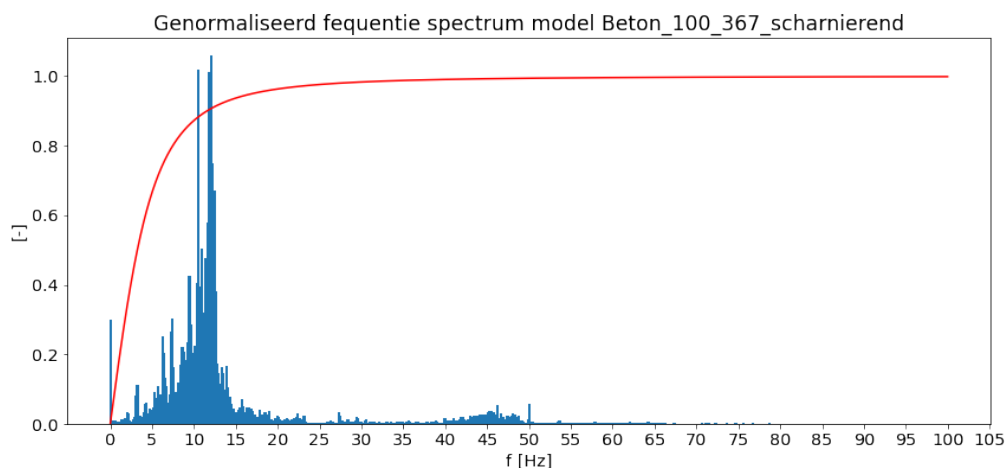
Ingekleemde betonwand 333 mm

De vloertrilling van het ingeklemde betonmodel met een wanddikte van 333 mm is weergegeven in Figuur G.46. Deze vloertrilling is getransformeerd middels de Fourier transformatie naar het frequentiedomein. In Figuur G.47 is de genormaliseerde Fourier transformatie getoond. De rode lijn representeert de weegfunctie vanuit de SBR. Na het toepassen van de weegfunctie en het terug transformeren, is het gewogen kwadratische gemiddelde toegepast voor het verkrijgen van de voortschrijdende effectieve waarde, zoals in Figuur G.48 getoond. De maximale waarde V_{max} bedraagt 0,74.

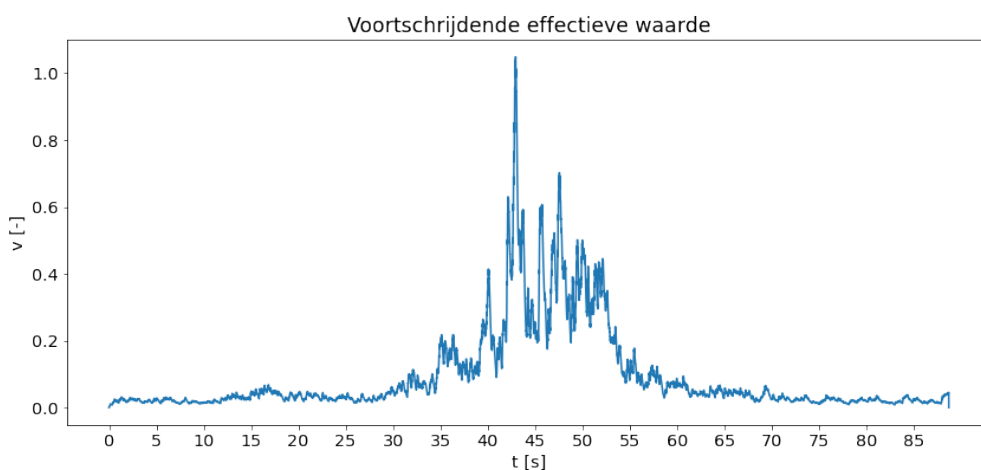
G.2.3. Overspanning

CLT overspanning 3,6 m

De vloertrilling van het CLT-model met een overspanning van 3,6 m is weergegeven in Figuur G.49. Deze vloertrilling is getransformeerd middels de Fourier transformatie naar het frequen-



Figuur G.23: FFT scharnierend betonmodel vloer 367,5 mm

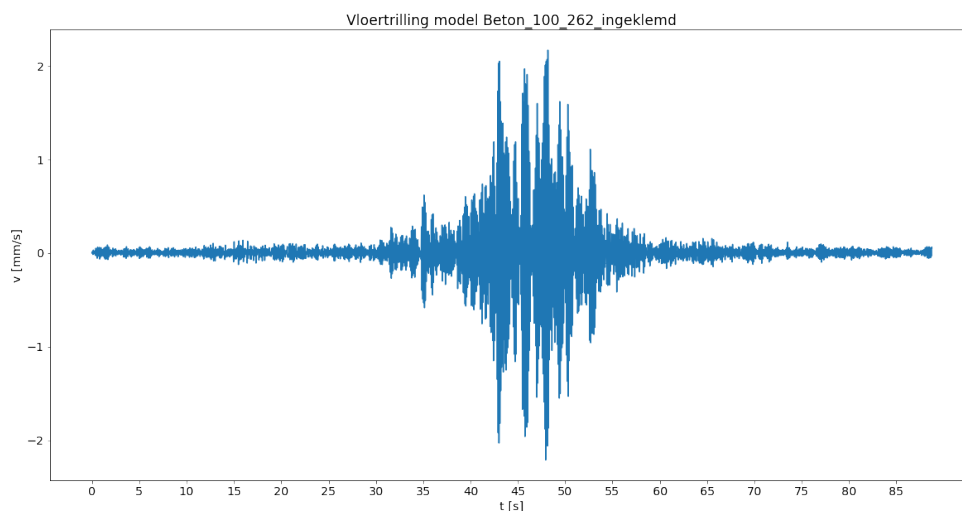


Figuur G.24: V_{eff} scharnierende betonmodel vloer 367,5 mm

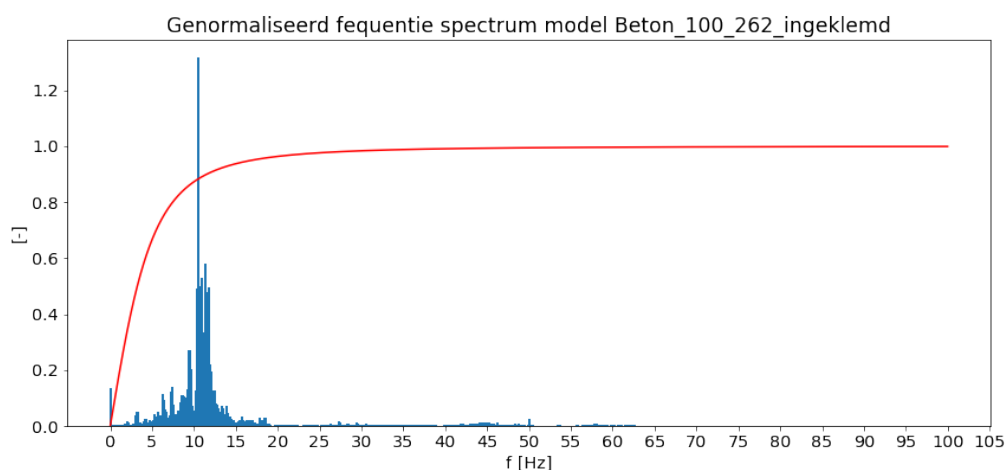
tiedomein. In Figuur G.50 is de genormaliseerde Fourier transformatie getoond. De rode lijn representeert de weegfunctie vanuit de SBR. Na het toepassen van de weegfunctie en het terug transformeren, is het gewogen kwadratische gemiddelde toegepast voor het verkrijgen van de voortschrijdende effectieve waarde, zoals in Figuur G.51 getoond. De maximale waarde V_{max} bedraagt 0,97.

CLT overspanning 7,2

De vloertrilling van het CLT-model met een overspanning van 7,2 m is weergegeven in Figuur G.52. Deze vloertrilling is getransformeerd middels de Fourier transformatie naar het frequentiedomein. In Figuur G.53 is de genormaliseerde Fourier transformatie getoond. De rode lijn representeert de weegfunctie vanuit de SBR. Na het toepassen van de weegfunctie en het terug transformeren, is het gewogen kwadratische gemiddelde toegepast voor het verkrijgen van de voortschrijdende effectieve waarde, zoals in Figuur G.54 getoond. De maximale waarde V_{max} bedraagt 0,12.



Figuur G.25: Vloertrilling ingeklemde betonmodel vloer 262,5 mm



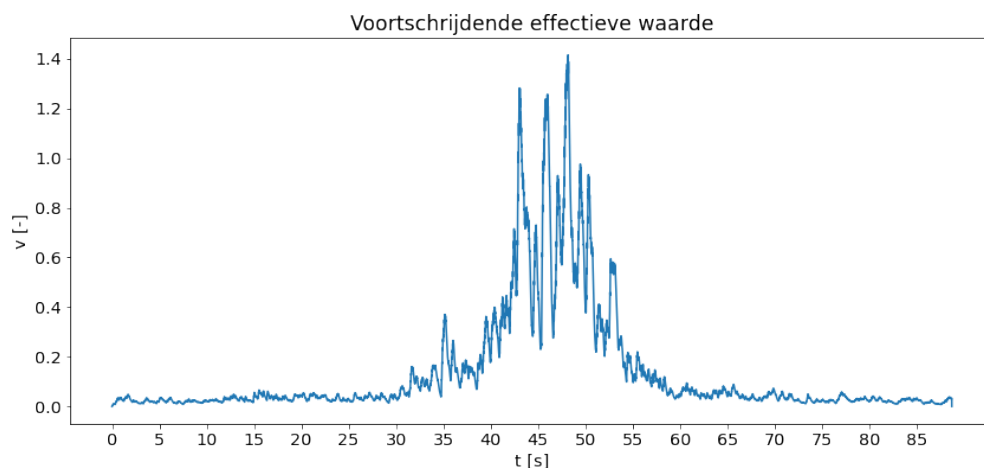
Figuur G.26: FFT ingeklemde betonmodel vloer 262,5 mm

Beton scharnierend overspanning 3,6 m

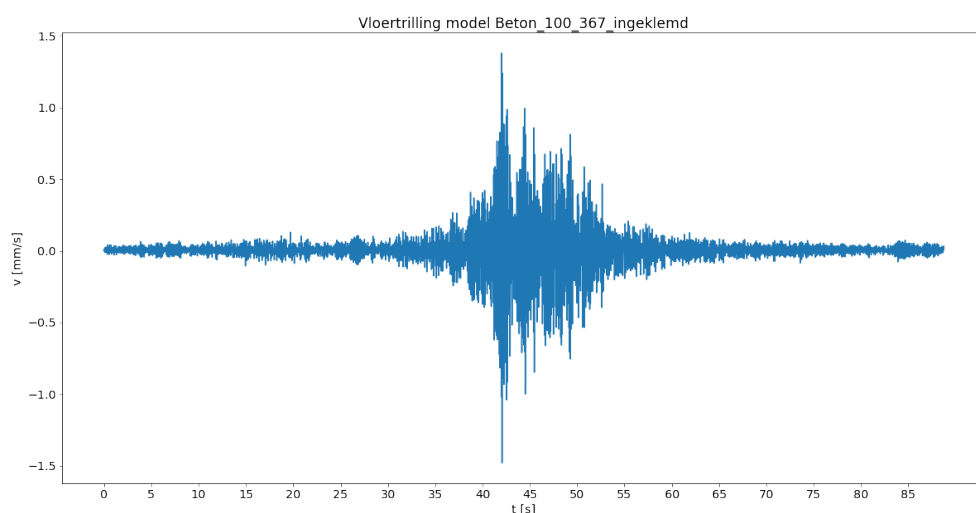
De vloertrilling van het scharnierende betonmodel met een overspanning van 3,6 m is weergegeven in Figuur G.55. Deze vloertrilling is getransformeerd middels de Fourier transformatie naar het frequentiedomein. In Figuur G.56 is de genormaliseerde Fourier transformatie getoond. De rode lijn representeert de weegfunctie vanuit de SBR. Na het toepassen van de weegfunctie en het terug transformeren, is het gewogen kwadratische gemiddelde toegepast voor het verkrijgen van de voortschrijdende effectieve waarde, zoals in Figuur G.57 getoond. De maximale waarde V_{max} bedraagt 0,83.

Beton scharnierend overspanning 7,2 m

De vloertrilling van het scharnierende betonmodel met een overspanning van 7,2 is weergegeven in Figuur G.58. Deze vloertrilling is getransformeerd middels de Fourier transformatie naar het frequentiedomein. In Figuur G.59 is de genormaliseerde Fourier transformatie getoond. De rode lijn representeert de weegfunctie vanuit de SBR. Na het toepassen van de



Figuur G.27: V_{eff} ingeklemde betonmodel vloer 262,5 mm

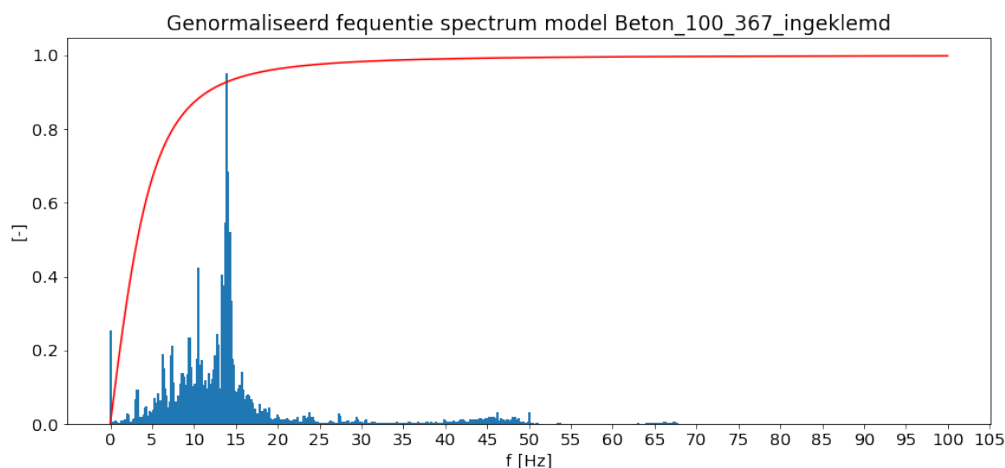


Figuur G.28: Vloertrilling ingeklemde betonmodel vloer 367,5 mm

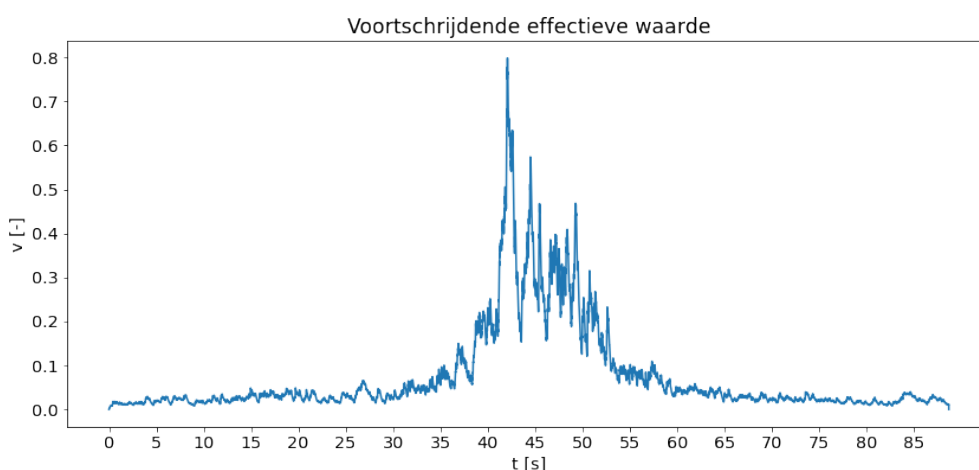
weegfunctie en het terug transformeren, is het gewogen kwadratische gemiddelde toegepast voor het verkrijgen van de voortschrijdende effectieve waarde, zoals in Figuur G.60 getoond. De maximale waarde V_{max} bedraagt 0,32.

Beton ingeklemd overspanning 3,6 m

De vloertrilling van het ingeklemde betonmodel met een overspanning van 3,6 is weergegeven in Figuur G.61. Deze vloertrilling is getransformeerd middels de Fourier transformatie naar het frequentiedomein. In Figuur G.62 is de genormaliseerde Fourier transformatie getoond. De rode lijn representeert de weegfunctie vanuit de SBR. Na het toepassen van de weegfunctie en het terug transformeren, is het gewogen kwadratische gemiddelde toegepast voor het verkrijgen van de voortschrijdende effectieve waarde, zoals in Figuur G.63 getoond. De maximale waarde V_{max} bedraagt 0,32.



Figuur G.29: FFT ingeklemde betonmodel vloer 367,5 mm



Figuur G.30: V_{eff} ingeklemde betonmodel vloer 367,5 mm

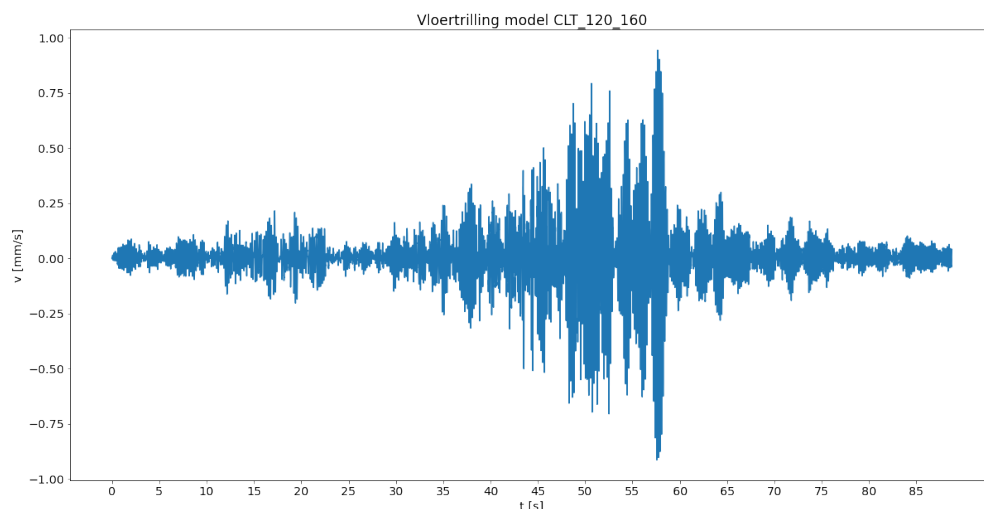
Beton ingeklemde overspanning 7,2 m

De vloertrilling van het ingeklemde betonmodel met een overspanning van 7,2 m is weergegeven in Figuur G.64. Deze vloertrilling is getransformeerd middels de Fourier transformatie naar het frequentiedomein. In Figuur G.65 is de genormaliseerde Fourier transformatie getoond. De rode lijn representeert de weegfunctie vanuit de SBR. Na het toepassen van de weegfunctie en het terug transformeren, is het gewogen kwadratische gemiddelde toegepast voor het verkrijgen van de voortschrijdende effectieve waarde, zoals in Figuur G.66 getoond. De maximale waarde V_{max} bedraagt 0,21.

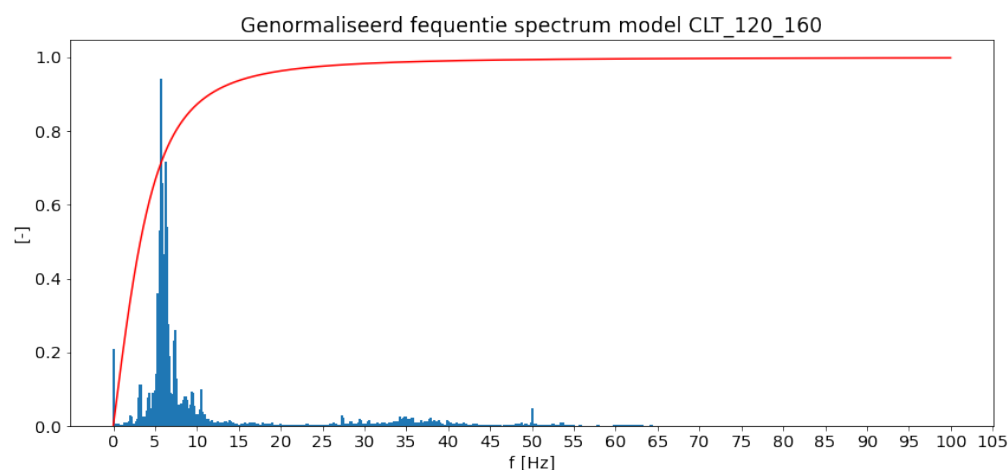
G.2.4. Tussenwanden

Tussenwand configuratie 1

De vloertrilling van het CLT-model met de tussenwand configuratie 1 is weergegeven in Figuur G.67. Deze vloertrilling is getransformeerd middels de Fourier transformatie naar het frequentiedomein. In Figuur G.68 is de genormaliseerde Fourier transformatie getoond. De rode lijn representeert de weegfunctie vanuit de SBR. Na het toepassen van de weegfunctie en het terug transformeren, is het gewogen kwadratische gemiddelde toegepast voor het ver-



Figuur G.31: Vloertrilling CLT model wand 120 mm

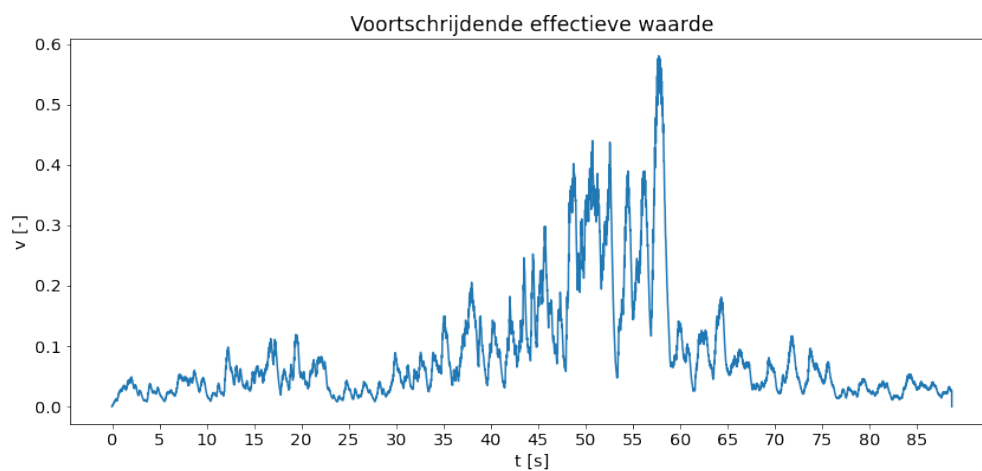
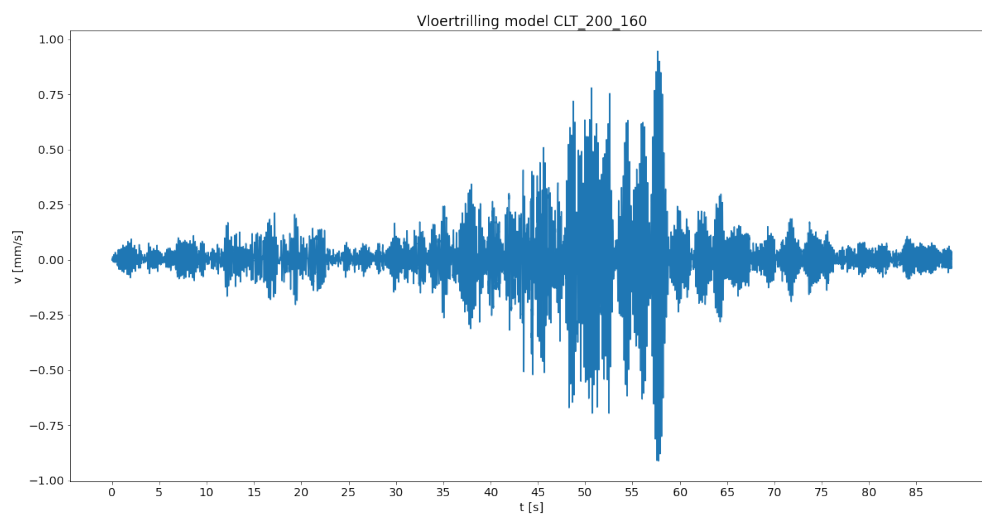


Figuur G.32: FFT CLT model wand 120 mm

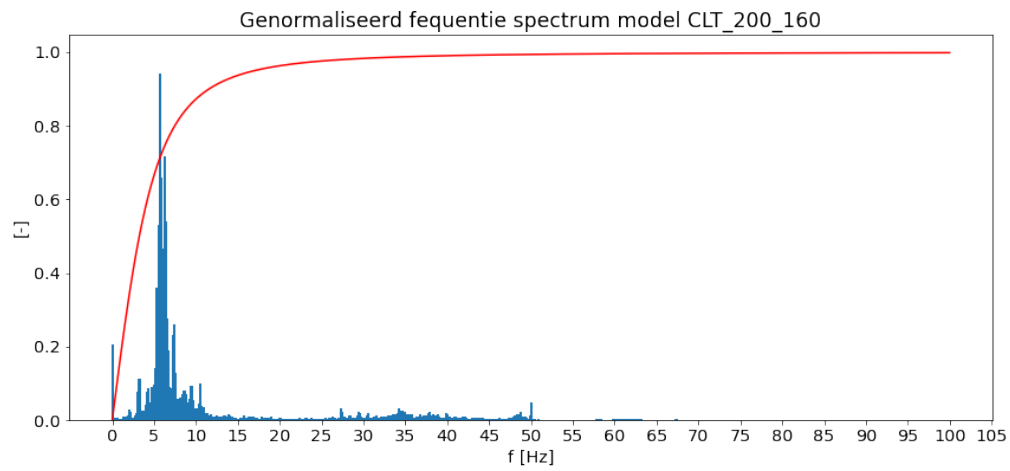
krijgen van de voortschrijdende effectieve waarde, zoals in Figuur G.69 getoond. De maximale waarde V_{max} bedraagt 0,28.

Tussenwand configuratie 2

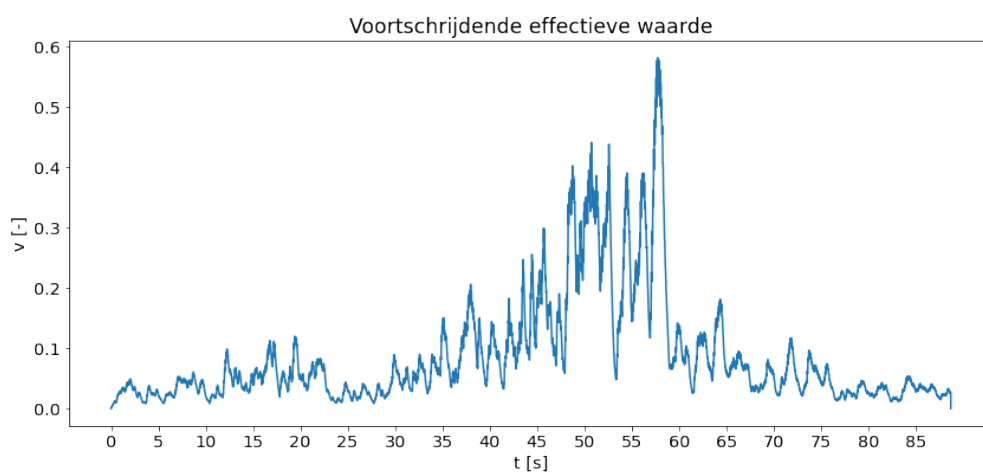
De vloertrilling van het CLT-model met de tussenwand configuratie 2 is weergegeven in Figuur G.70. Deze vloertrilling is getransformeerd middels de Fourier transformatie naar het frequentiedomein. In Figuur G.71 is de genormaliseerde Fourier transformatie getoond. De rode lijn representeert de weegfunctie vanuit de SBR. Na het toepassen van de weegfunctie en het terug transformeren, is het gewogen kwadratische gemiddelde toegepast voor het verkrijgen van de voortschrijdende effectieve waarde, zoals in Figuur G.72 getoond. De maximale waarde V_{max} bedraagt 0,5.

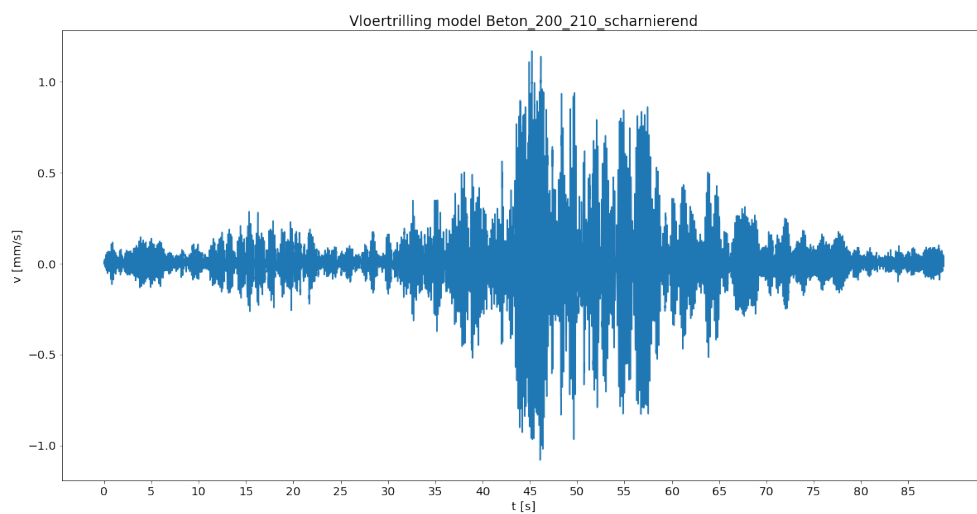
Figuur G.33: V_{eff} CLT model wand 120 mm

Figuur G.34: Vloertrilling CLT model wand 200 mm

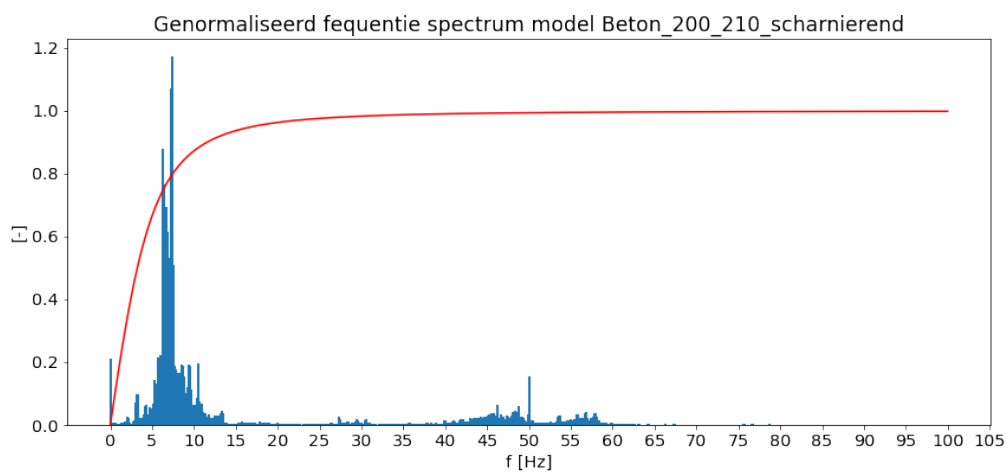


Figuur G.35: FFT CLT model wand 200 mm

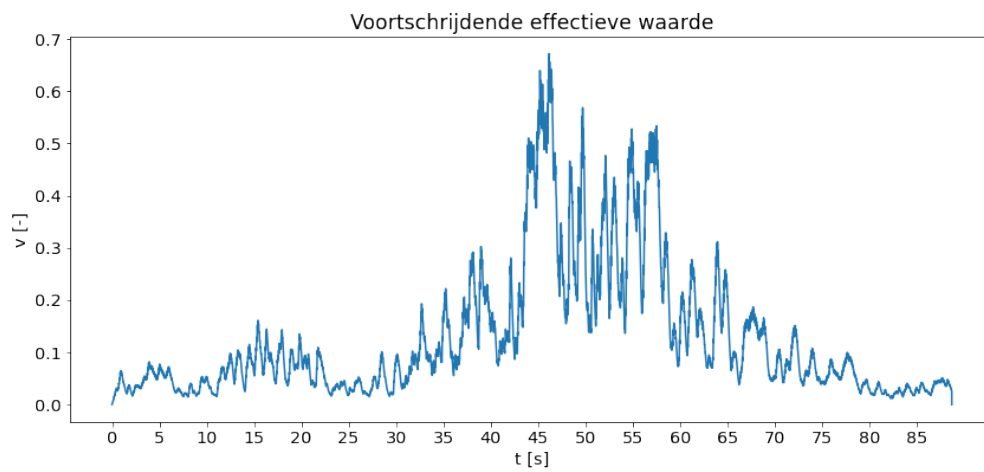
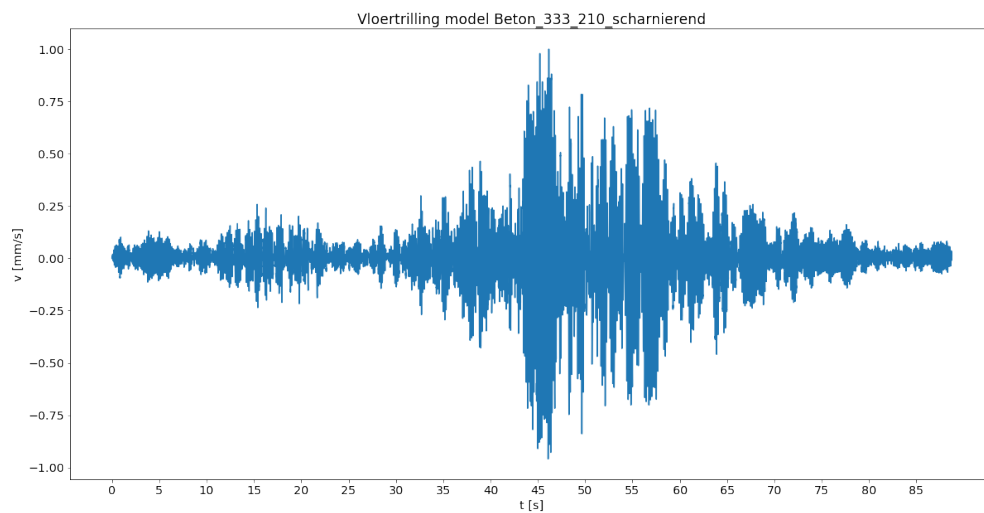
Figuur G.36: V_{eff} CLT model wand 200 mm



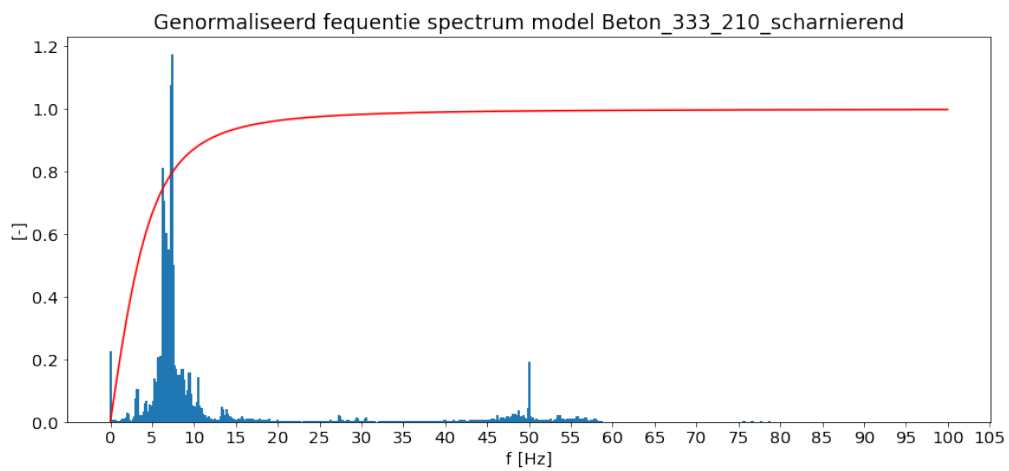
Figuur G.37: Vloertrilling scharnierend betonmodel wand 200 mm



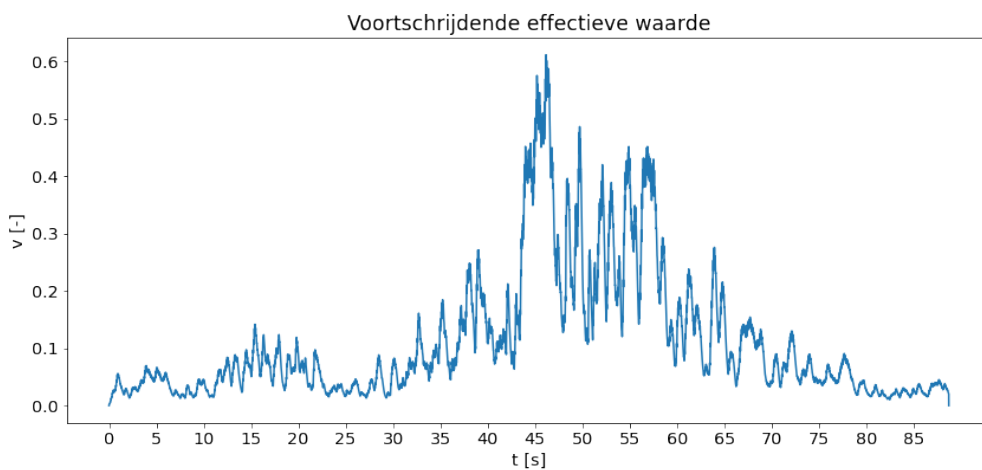
Figuur G.38: FFT scharnierend betonmodel wand 200 mm

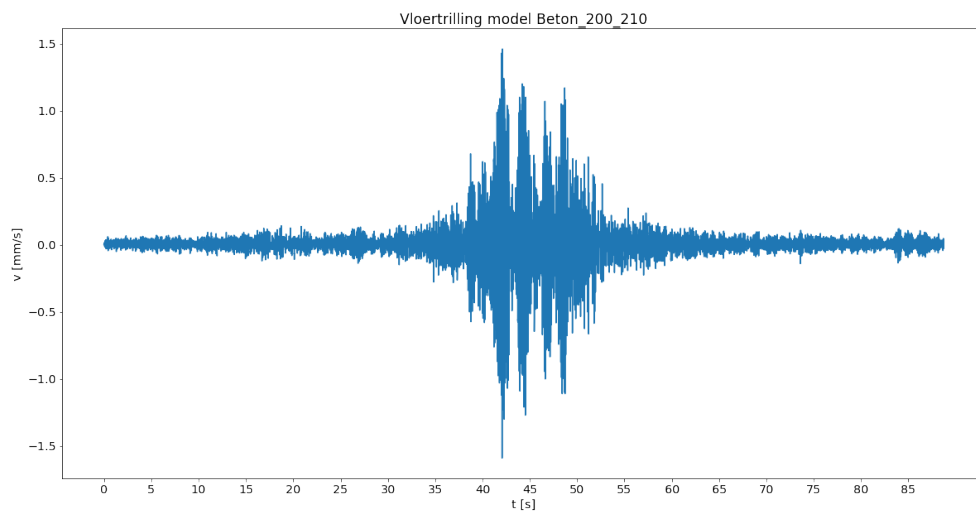
Figuur G.39: V_{eff} scharnierend betonmodel wand 200 mm

Figuur G.40: Vloertrilling scharnierend betonmodel wand 333 mm

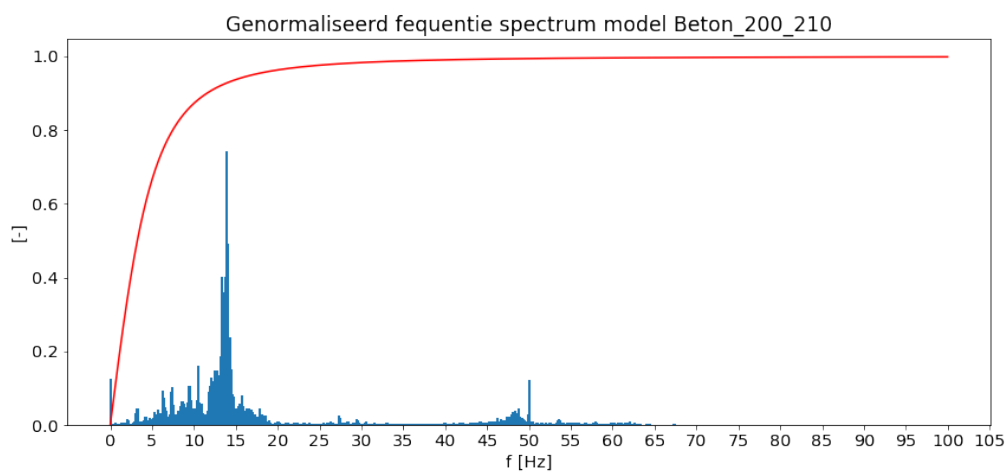


Figuur G.41: FFT scharnierend betonmodel wand 333 mm

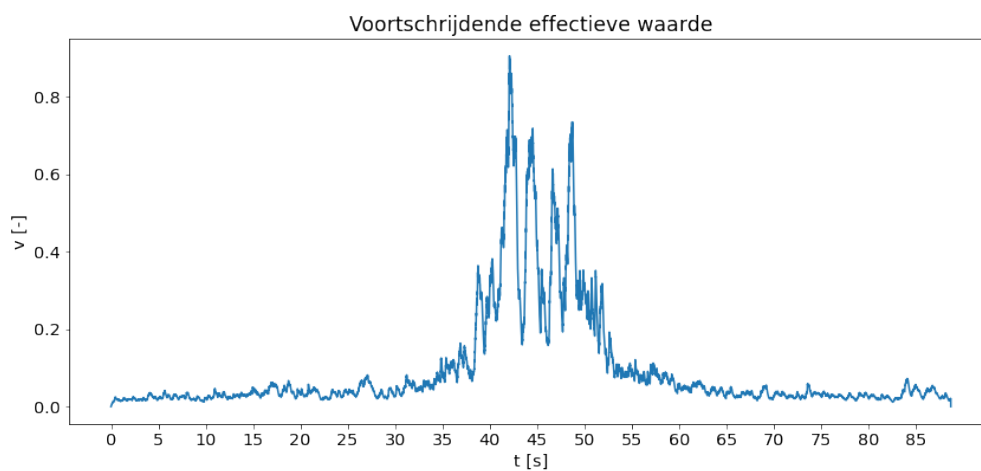
Figuur G.42: V_{eff} scharnierend betonmodel wand 333 mm



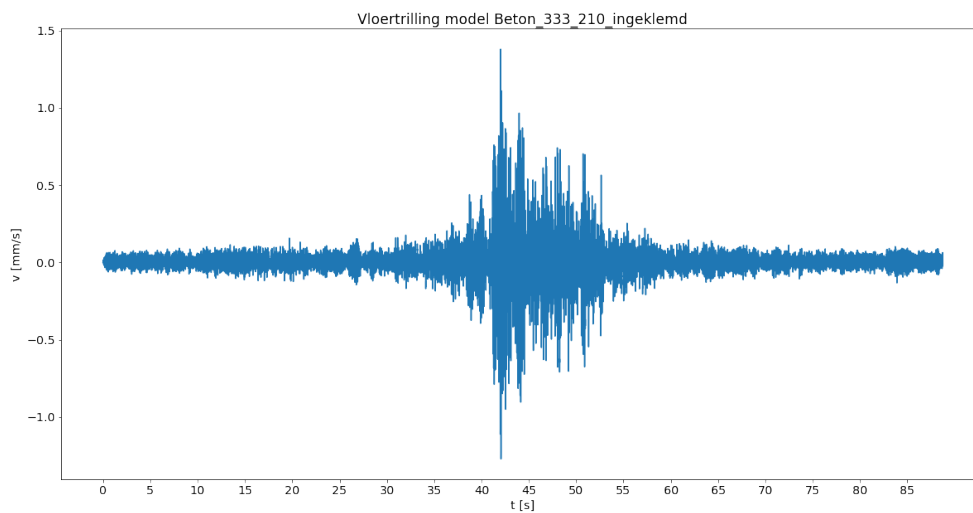
Figuur G.43: Vloertrilling ingeklemd betonmodel wand 200 mm



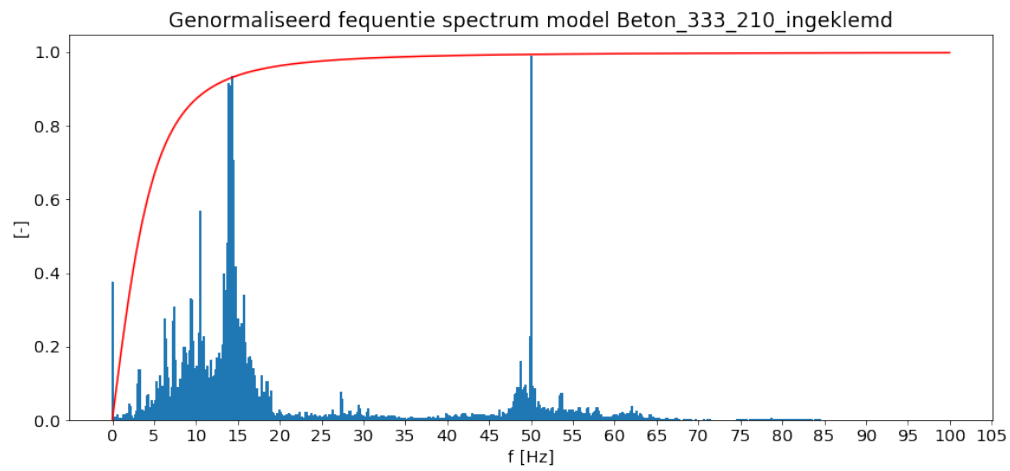
Figuur G.44: FFT ingeklemd betonmodel wand 200 mm



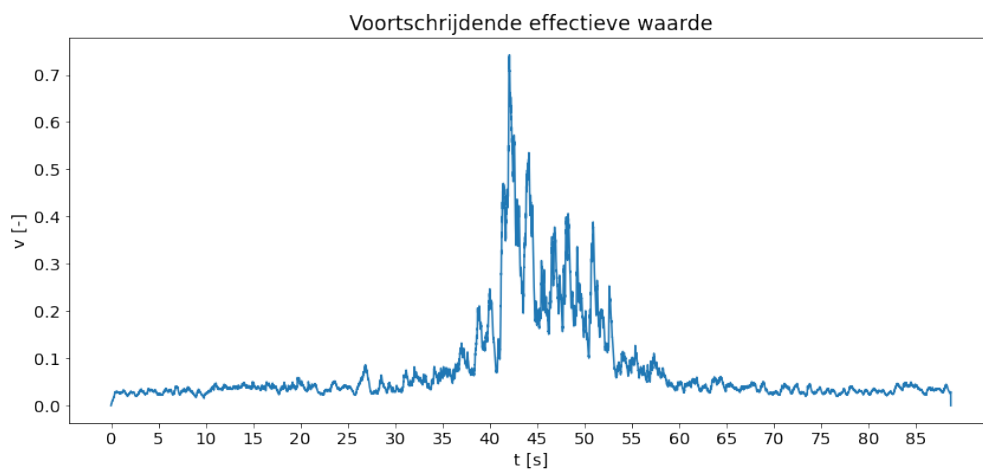
Figuur G.45: V_{eff} ingeklemd betonmodel wand 200 mm

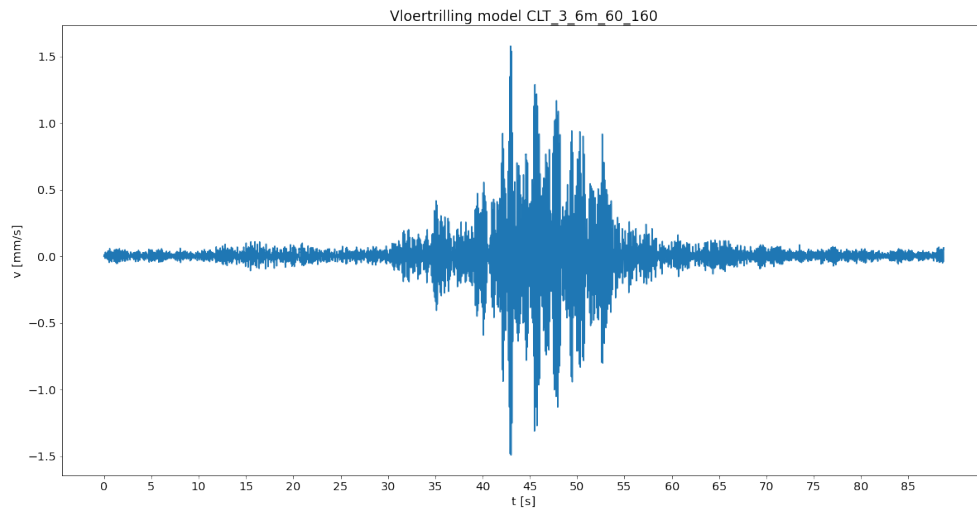


Figuur G.46: Vloertrilling ingeklemd betonmodel wand 333 mm

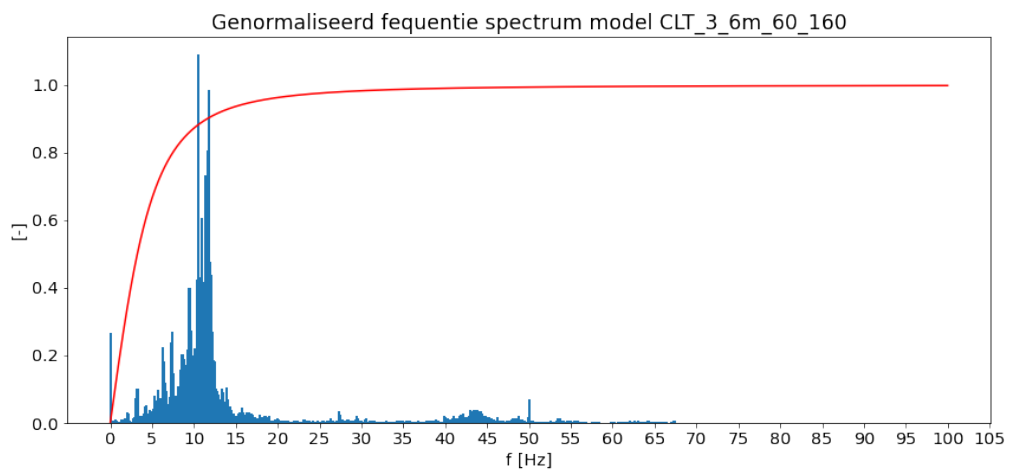


Figuur G.47: FFT ingeklemd betonmodel wand 333 mm

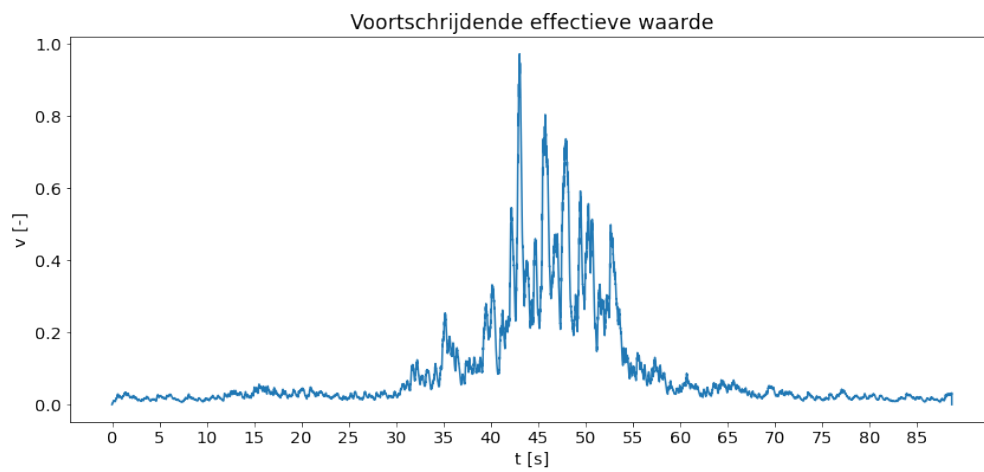
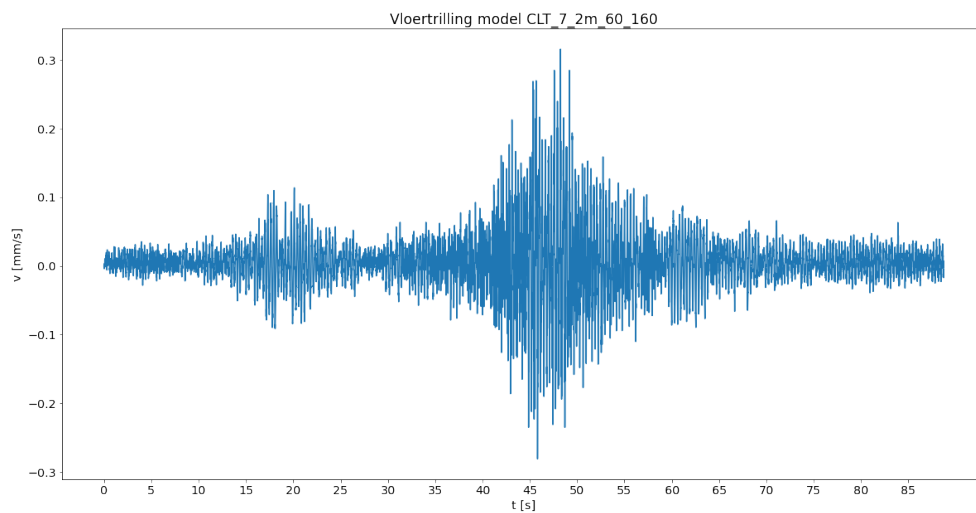
Figuur G.48: V_{eff} ingeklemd betonmodel wand 333 mm



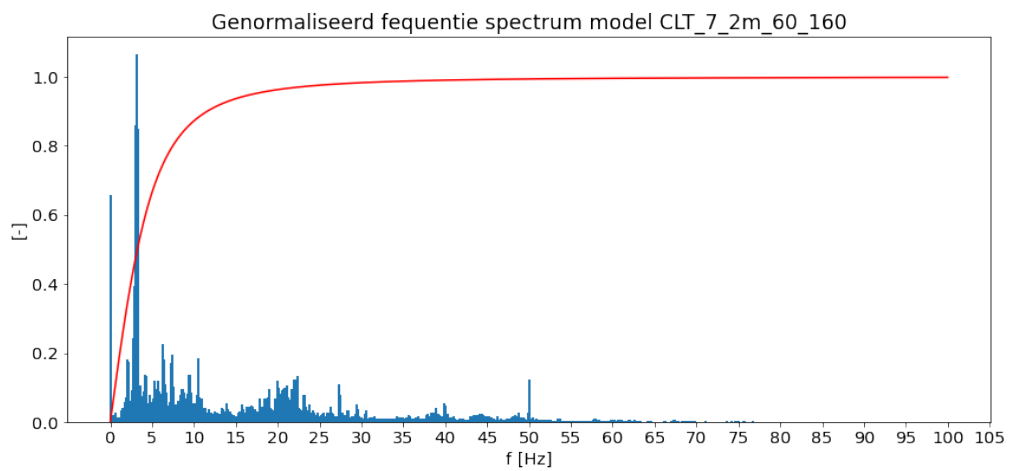
Figuur G.49: Vloertrilling CLT-model overspanning 3,6 m



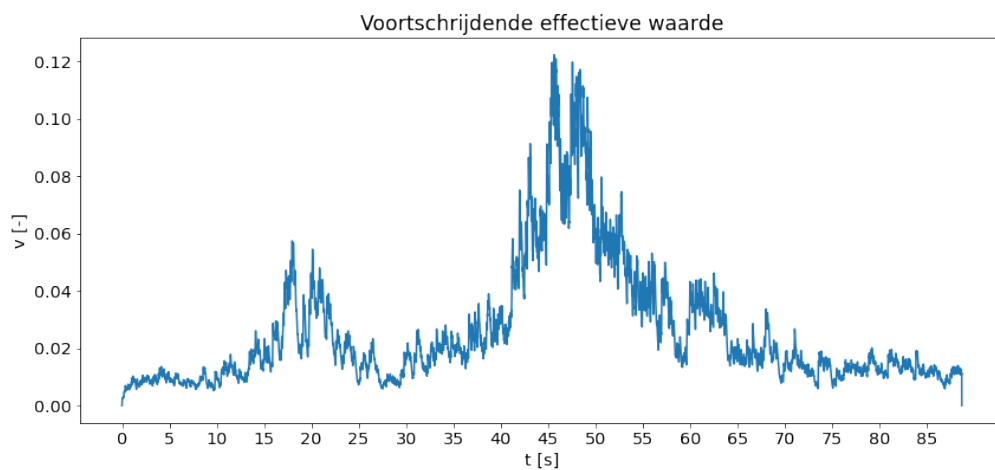
Figuur G.50: FFT ingeklemd CLT-model overspanning 3,6 m

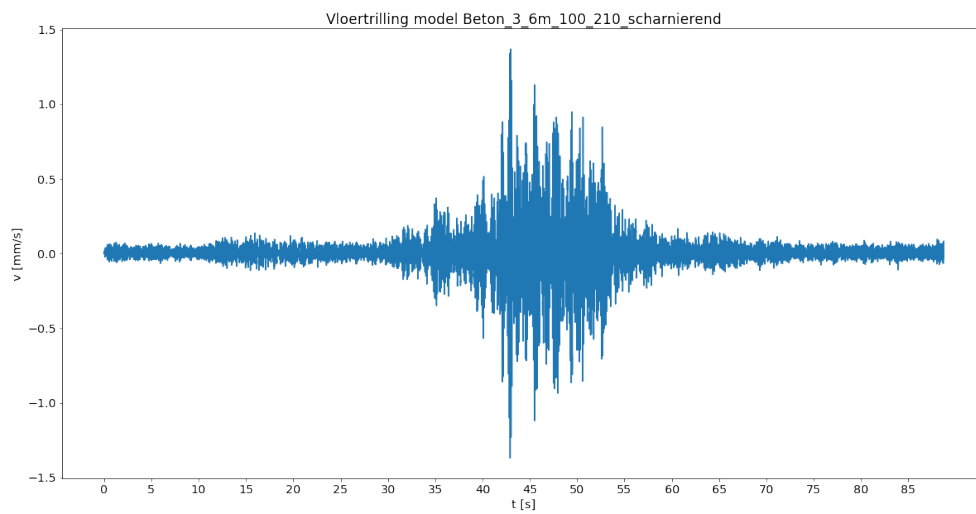
Figuur G.51: V_{eff} CLT-model overspanning 3,6 m

Figuur G.52: Vloertrilling CLT model overspanning 7,2m

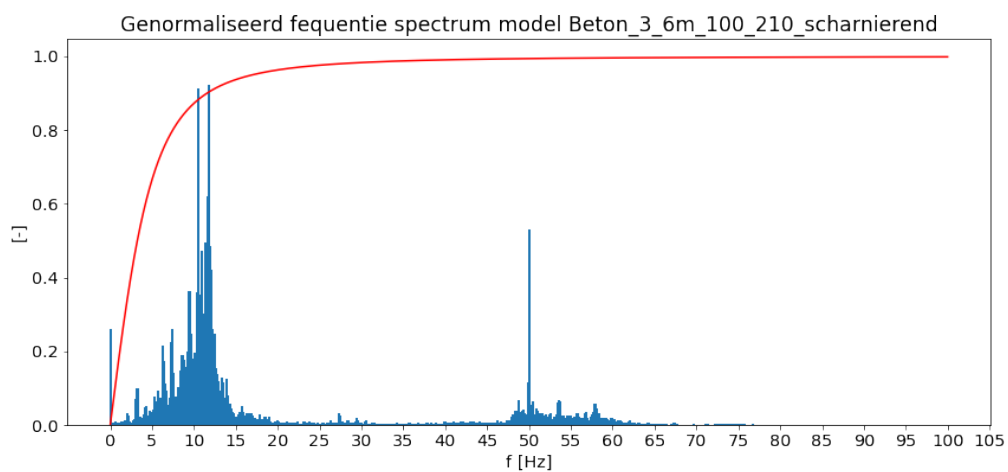


Figuur G.53: FFT ingeklemd CLT model overspanning 7,2 m

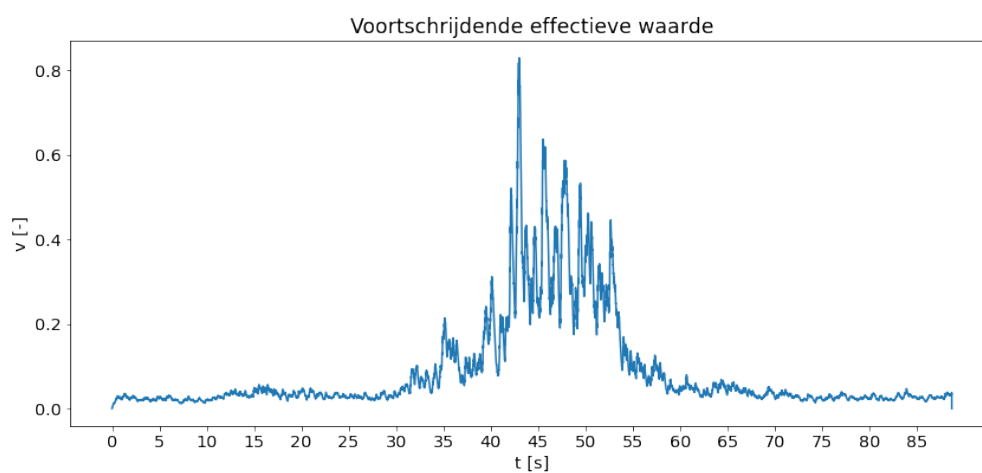
Figuur G.54: V_{eff} CLT model overspanning 7,2 m



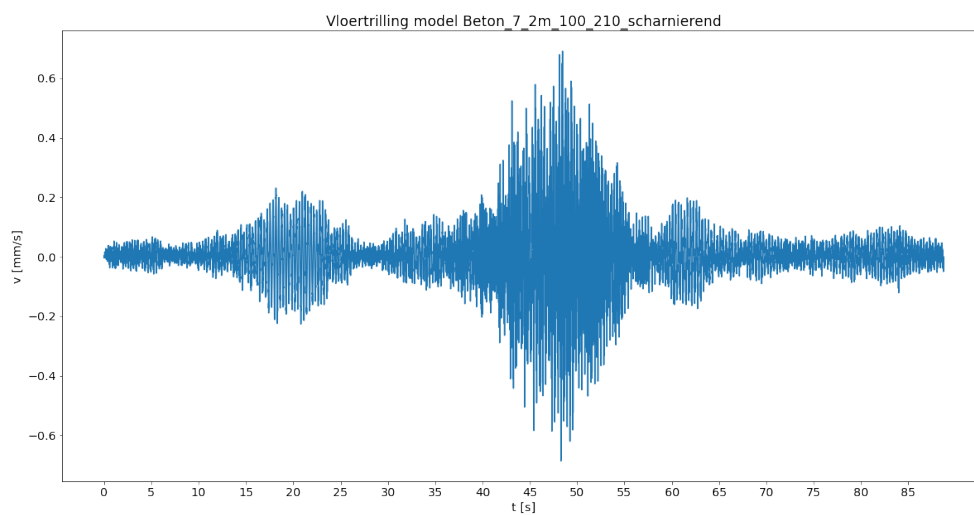
Figuur G.55: Vloertrilling scharnierend betonmodel overspanning 3,6 m



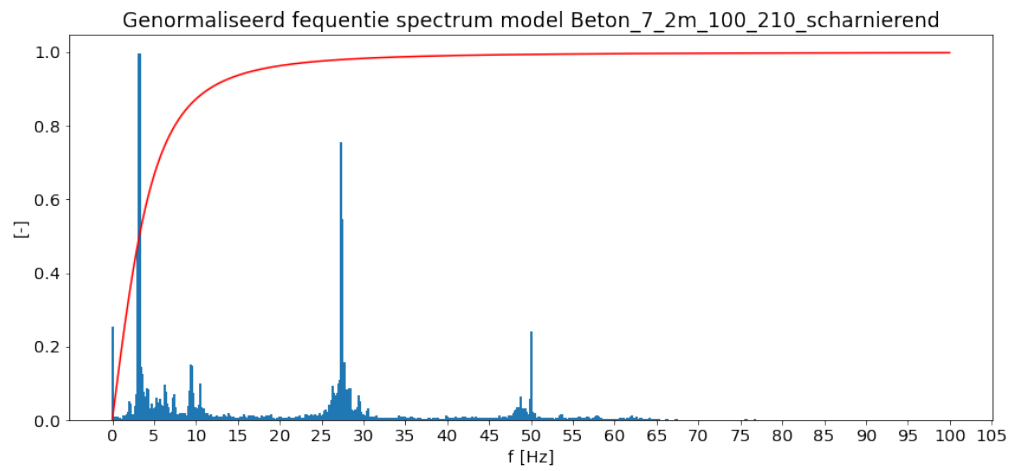
Figuur G.56: FFT scharnierend betonmodel overspanning 3,6 m



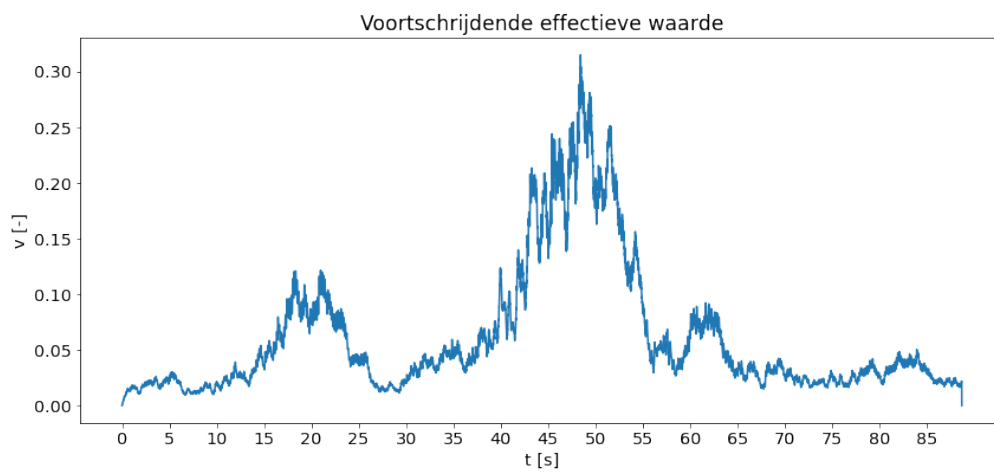
Figuur G.57: V_{eff} scharnierend betonmodel overspanning 3,6 m

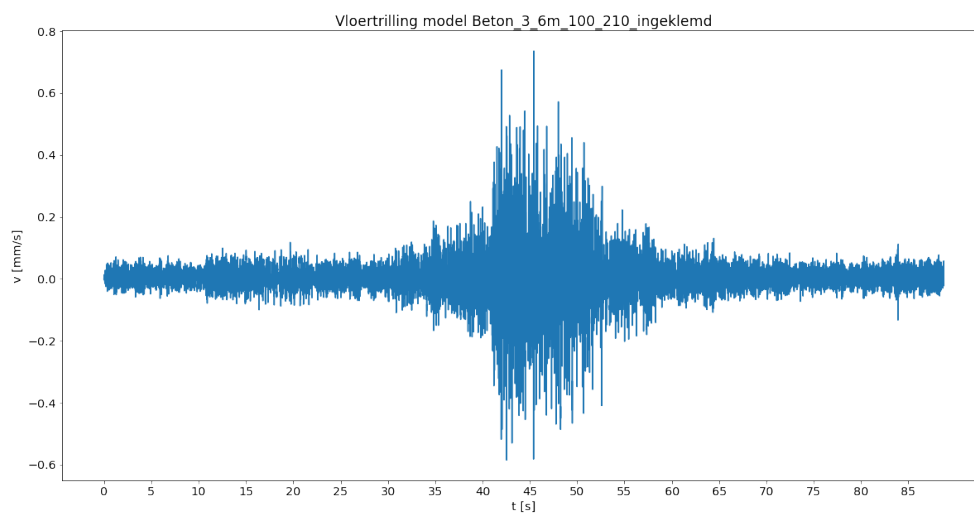


Figuur G.58: Vloertrilling scharnierend betonmodel overspanning 7,2 m

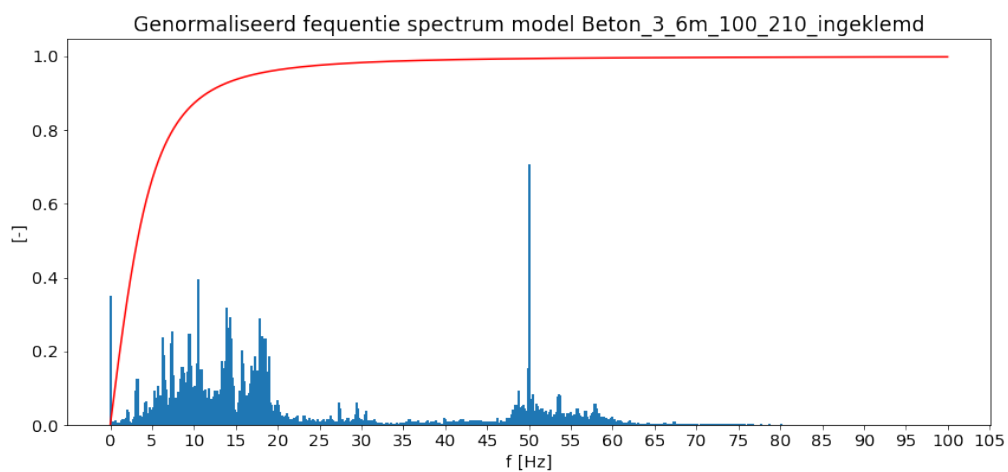


Figuur G.59: FFT scharnierend betonmodel overspanning 7,2 m

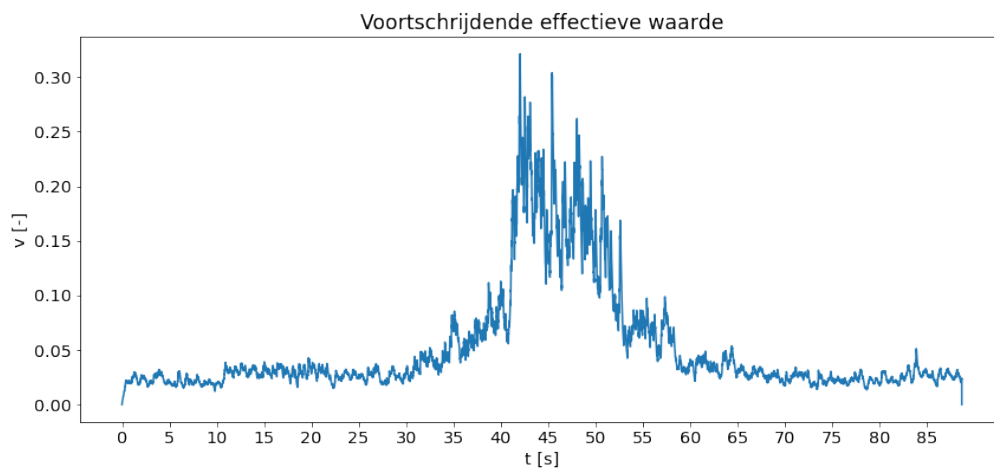
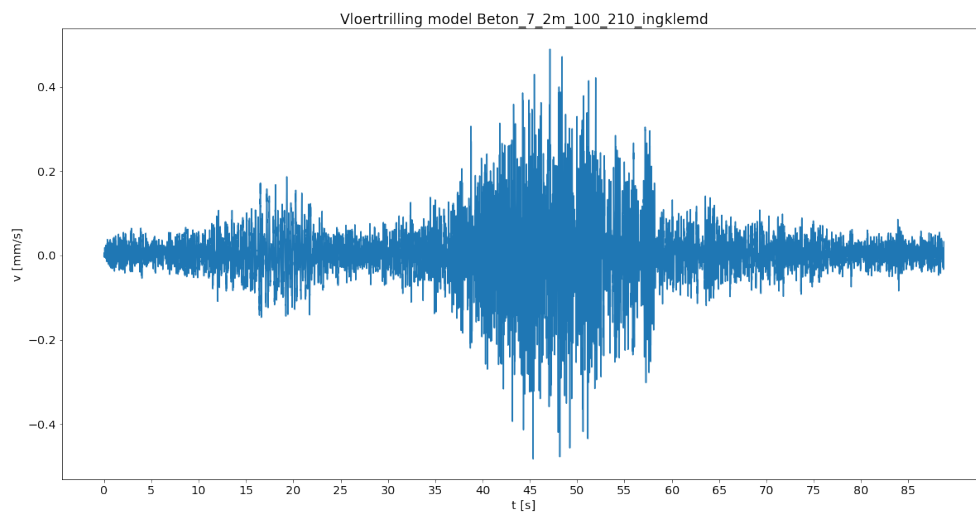
Figuur G.60: V_{eff} scharnierend betonmodel overspanning 7,2 m



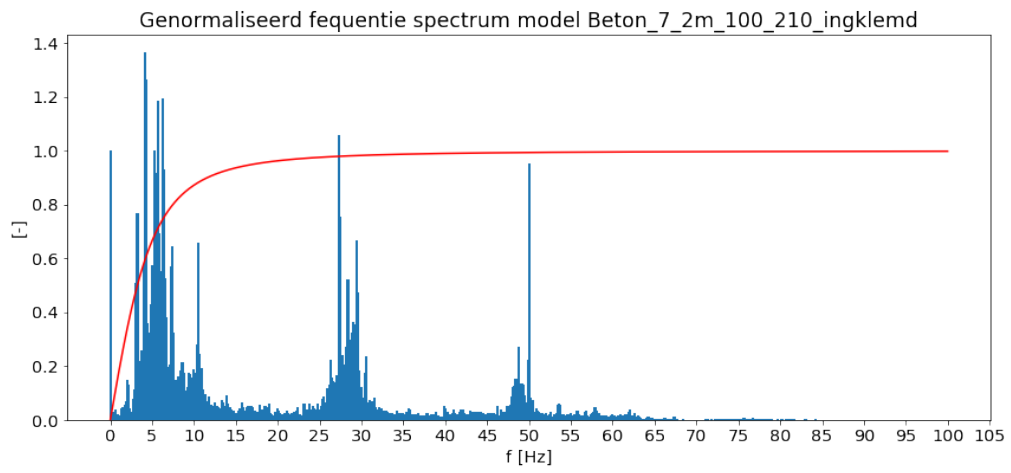
Figuur G.61: Vloertrilling ingeklemd betonmodel overspanning 3,6 m



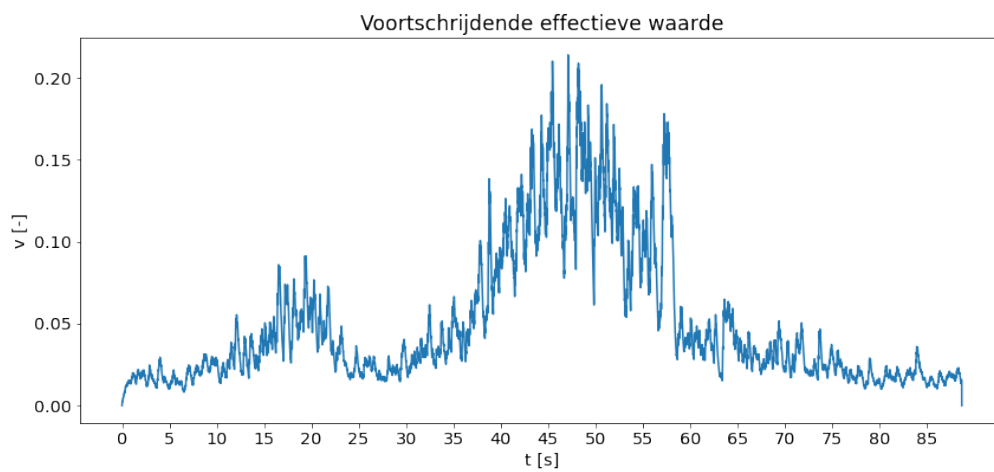
Figuur G.62: FFT ingeklemd betonmodel overspanning 3,6 m

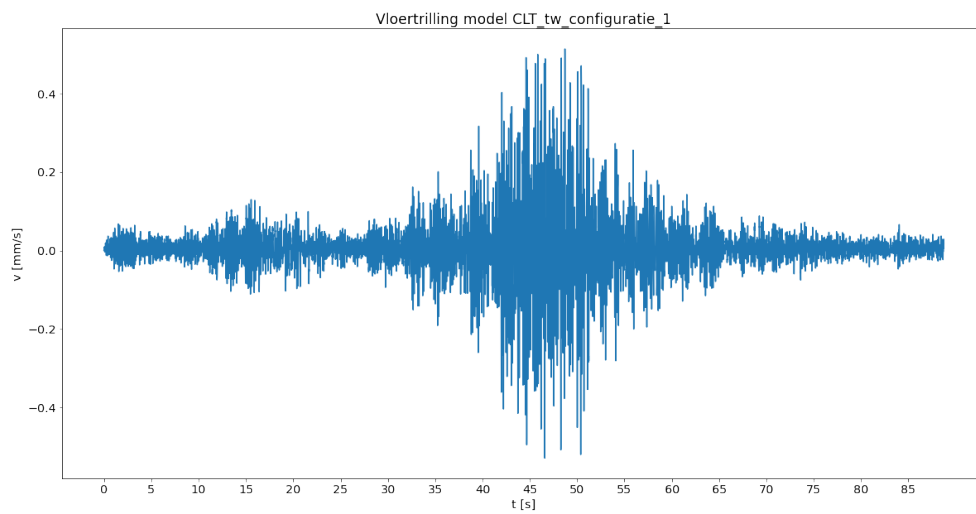
Figuur G.63: V_{eff} ingeklemd betonmodel overspanning 3,6 m

Figuur G.64: Vloertrilling ingeklemd betonmodel overspanning 7,2 m

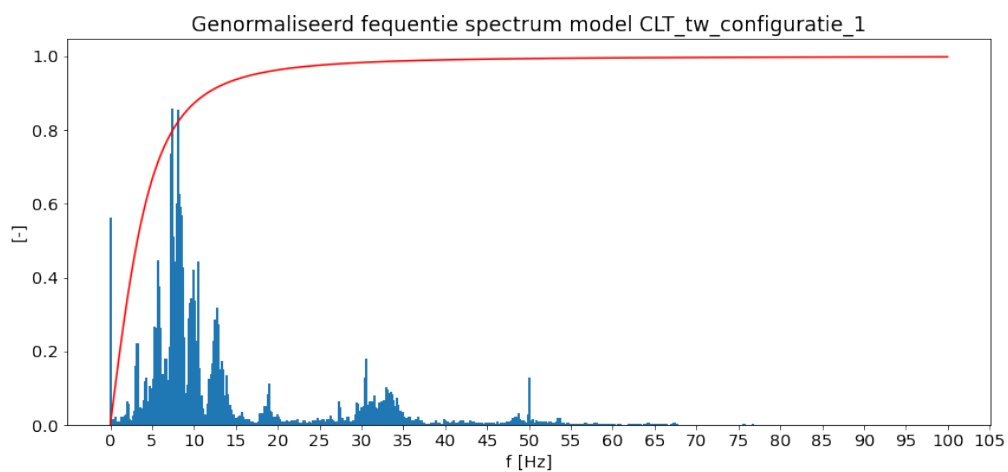


Figuur G.65: FFT ingklemd betonmodel overspanning 7,2 m

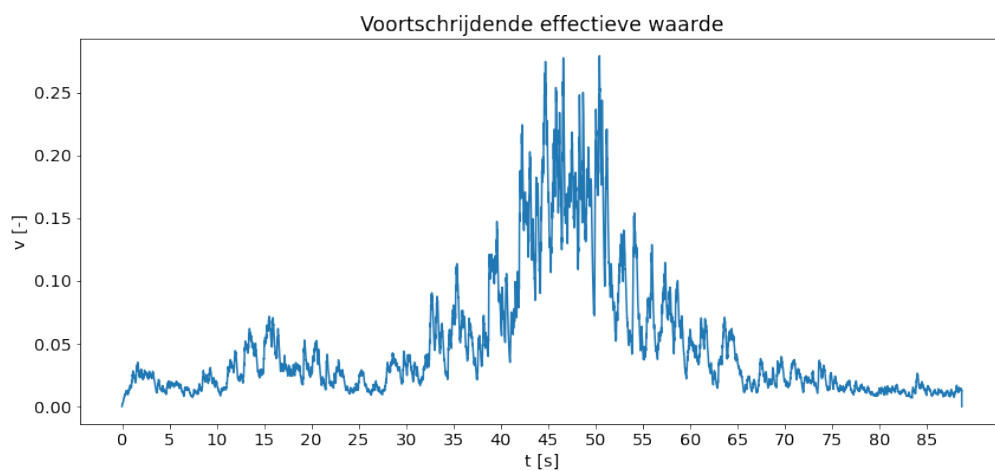
Figuur G.66: V_{eff} ingklemd betonmodel overspanning 7,2 m



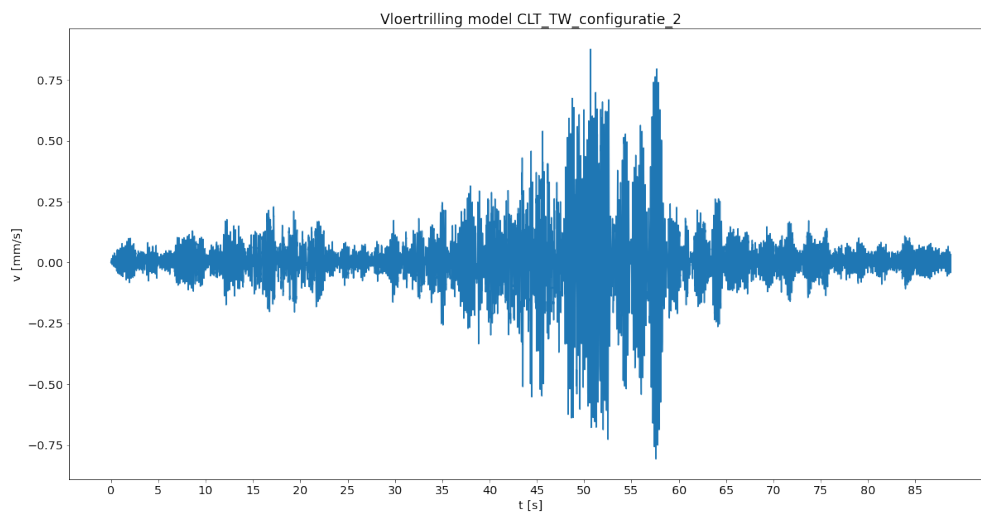
Figuur G.67: Vloertrilling CLT-model tussenwanden configuratie 1



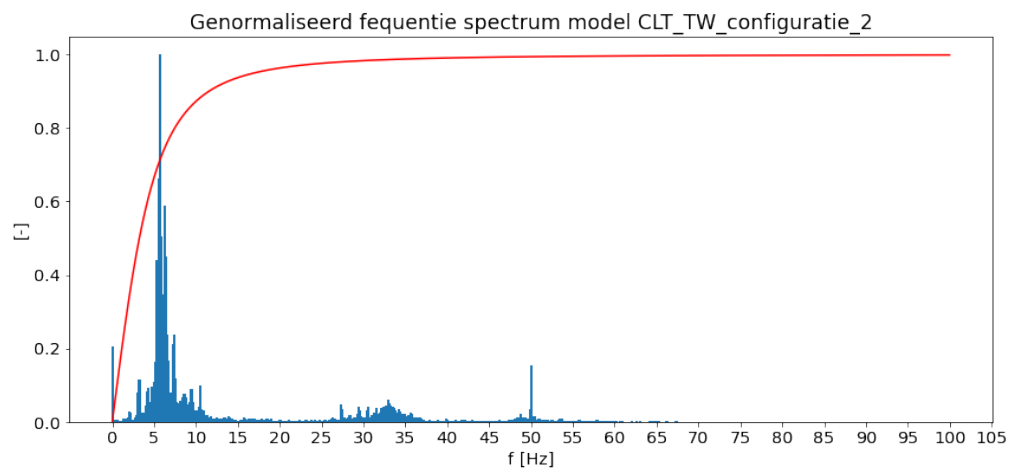
Figuur G.68: FFT ingeklemd CLT-model tussenwanden configuratie 1



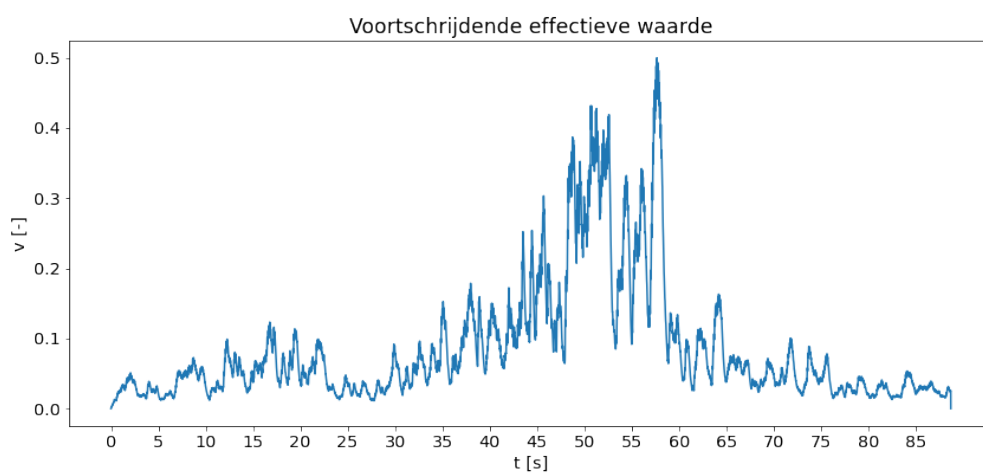
Figuur G.69: V_{eff} CLT-model tussenwanden configuratie 1

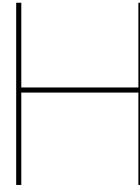


Figuur G.70: Vloertrilling CLT-model tussenwanden configuratie 2



Figuur G.71: FFT ingeklemd CLT-model tussenwanden configuratie 2

Figuur G.72: V_{eff} CLT-model tussenwanden configuratie 2



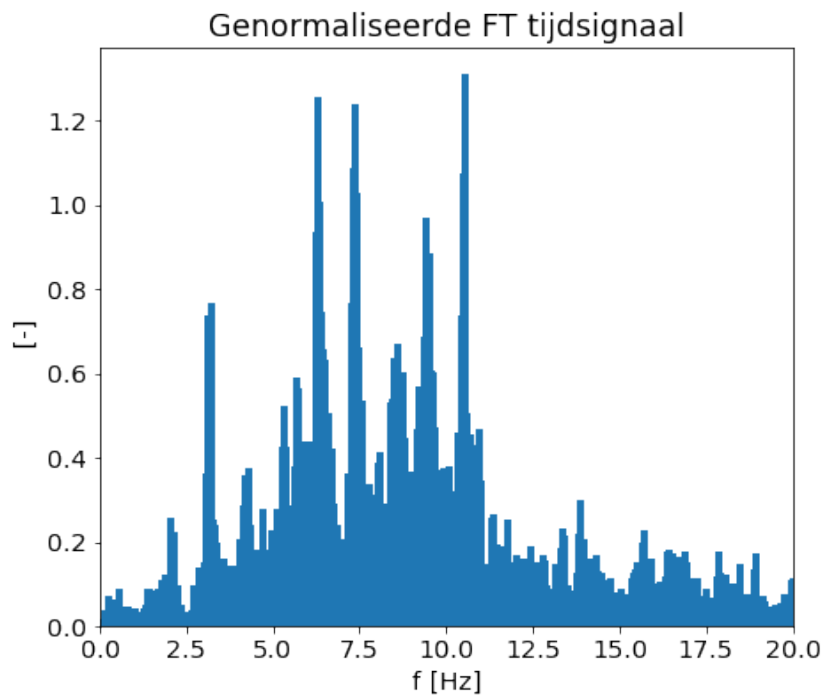
Effect van aanpassing op spectrum

In Bijlage H is het effect van het toepassen van het kwadratisch gemiddelde en de verdeling van een spectrum over de een derde octaafbanden onderzocht. Aan de hand van het bestaande tijdsignaal van de originele treinpassage P12 zijn twee varianten van het spectrum vergeleken met de Fourier transformatie van het spectrum (zie figuur H.1).

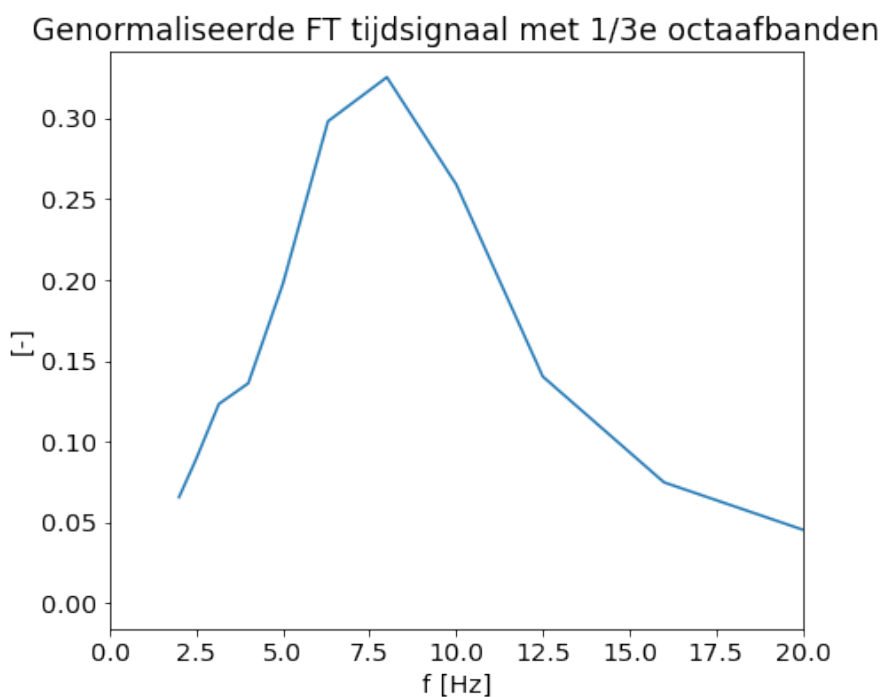
Bij variant 1 is het effect op het spectrum onderzocht waarbij de Fourier transformatie is opgedeeld in een derde octaafbanden (zie Figuur H.2). Bij variant 2 is het kwadratisch gemiddelde op de Fourier transformatie toegepast en daarna opgedeeld in octaafbanden (zie Figuur H.4). Het blijkt dat vergeleken het originele Fourier transformatie de pieken van variant 1 worden afgevlakt. Ook de dalen van de Fourier transformatie zijn niet meer zichtbaar met het toepassen van een derde octaafbanden (zie Figuur H.2).

In variant 2 is het kwadratisch gemiddelde van de originele Fourier transformatie berekend. In Figuur H.3 is waarneembaar dat die pieken een lagere waarde hebben. Dit is ook zichtbaar wanneer de Fourier transformatie is uitgezet tegen een derde octaafbanden (zie Figuur H.4). Behalve dat het kwadratische gemiddelde de waarde van het spectrum verlaagd, zijn geen grote verschillen zichtbaar tussen variant 1 en variant 2.

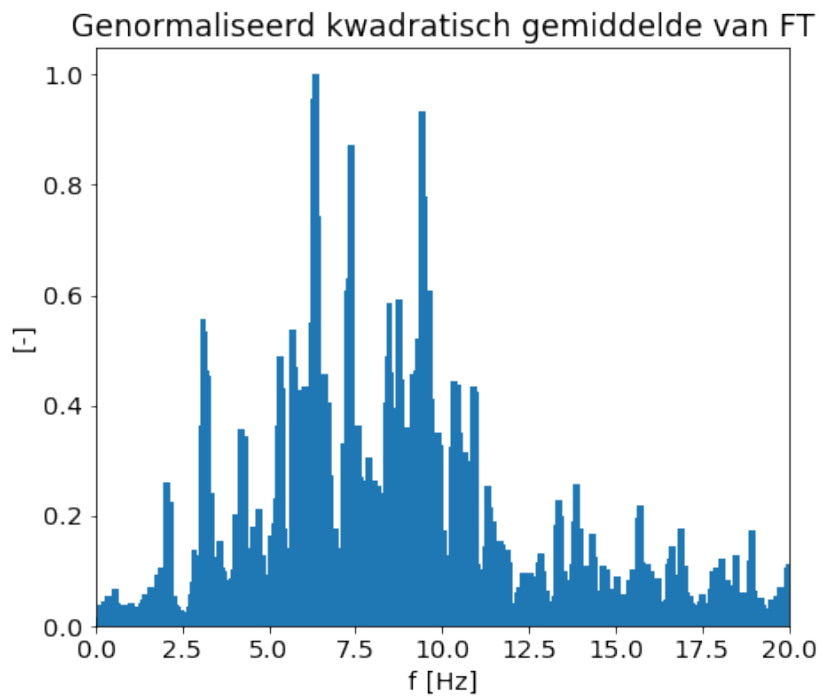
Geconcludeerd wordt dat voornamelijk toepassen van een derde octaafbanden bij de Fourier transformatie zichtbaar effect heeft op de pieken en dalen van het spectrum. Het toepassen van het kwadratisch gemiddelde resulteert lagere waardes van het spectrum, maar tast de pieken en dalen in mindere maten aan.



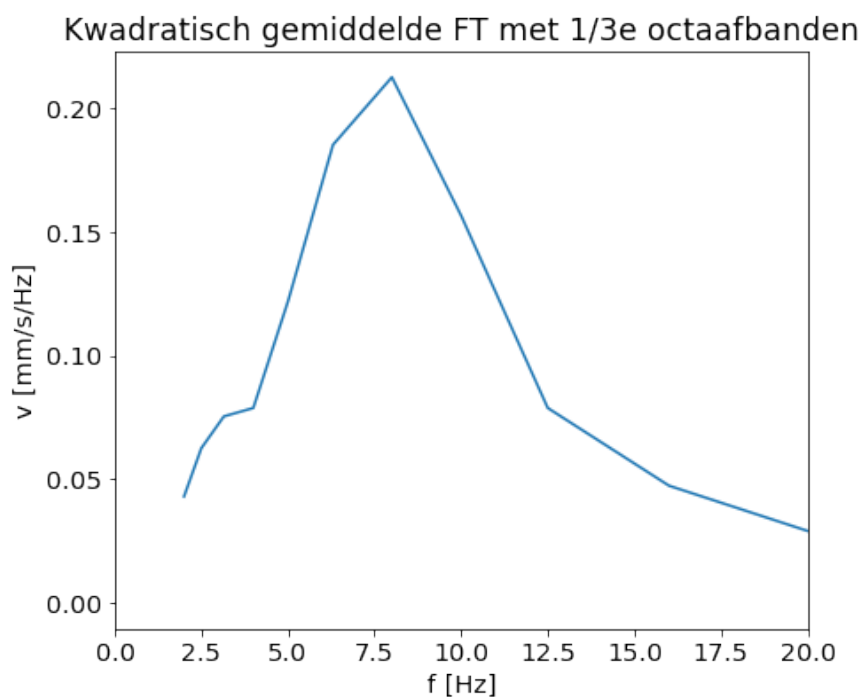
Figuur H.1: Genormaliseerde Fourier transformatie van de treinpassage.



Figuur H.2: Variant 1: Genormaliseerde Fourier transformatie van de treinpassage opgedeeld in een derde octaafbanden.



Figuur H.3: Kwadratisch gemiddelde toegepast op het genormaliseerde Fourier transformatie van de treinpassage.



Figuur H.4: Variant 2: Kwadratisch gemiddelde toegepast op het genormaliseerde Fourier transformatie van de treinpassage.



Tabellen kwantitatieve prognose

Model	toename [%]	product [m^2/s^2]	Δ [%]
Referentiemodellen			
CLT	-	0,83	-
Beton scharnierend	-	1,21	45,6
Beton ingeklemd	-	1,60	92,9
Variërende vloerdikte CLT			
160 mm	100	0,83	-
200 mm	125	1,00	20,2
280 mm	175	1,35	62,9
360 mm	225	0,81	-20,4
Variërende vloerdikte beton scharnierend			
210 mm	100	1,21	-
262,5 mm	125	1,40	15,4
367,5 mm	175	0,86	-28,8
Variërende vloerdikte beton ingeklemd			
210 mm	100	1,60	-
262,5 mm	125	1,3	-29,3
367,5 mm	175	0,71	-55,9
Variërende wanddikte CLT			
60 mm	100	0,83	-
120 mm	200	0,79	-4,1
200 mm	333	0,80	-3,4
Variërende wanddikte beton scharnierend			
100 mm	100	1,21	-
200 mm	200	1,16	-4,1
333 mm	333	1,17	-3,6
Variërende vloerdikte beton ingeklemd			
100 mm	100	1,60	-
200 mm	200	0,76	-52,8
333 mm	333	0,81	-49,5
Variërende overspanning CLT			
5,4 m	100	0,83	-
3,6 m	67	0,79	-4,6
7,2 m	133	0,26	-68,7
Variërende overspanning beton scharnierend			
5,4 m	100	1,21	-
3,6 m	67	0,32	-34,9
7,2 m	133	0,36	-69,9
Variërende overspanning beton ingeklemd			
5,4 m	100	1,60	-
3,6 m	67	0,32	-79,9
7,2 m	133	0,44	-72,7
Tussenwanden CLT			
geen tussenwanden		0,83	-
Configuratie 1: doorlopend		1,25	50,2
Configuratie 2: verspringen		1,82	118,8

Tabel I.1: Kwantitatieve voorspelling trillingshinder aan de hand van de amplitude van de resonantiepiek en de trillingsterkte van het gemeten spectrum.

Model	Prognose product [m^2/s^2]	Δ [%]	Toetsing SBR waarde [-]	Δ [%]	Absoluut verschil [%]
Referentiemodellen					
CLT	0,83	-	0,55	-	-
Beton scharnierend	1,21	45,6	0,68	23,6	22,0
Beton ingeklemd	1,60	92,9	1,35	145,5	-52,5
vloer CLT					
160 mm	0,83	-	0,55	-	-
200 mm	1,00	20,2	0,55	0,0	20,2
280 mm	1,35	62,9	1,30	136,4	-37,5
360 mm	0,81	-2,4	0,98	78,2	-80,6
vloer beton schar					
210 mm	1,21	-	0,68	-	-
262,5 mm	1,40	15,4	0,61	-10,3	25,7
367,5 mm	0,86	-28,8	1,08	58,8	-87,6
Variërende vloerdikte beton ingeklemd					
210 mm	1,60	-	1,35	-	-
262,5 mm	1,3	-29,3	1,42	5,2	-34,5
367,5 mm	0,71	-55,9	0,80	-40,7	-15,1
Variërende wanddikte CLT					
60 mm	0,83	-	0,55	-	-
120 mm	0,79	-4,1	0,58	5,5	-10,7
200 mm	0,80	-3,4	0,58	5,5	-8,9
Variërende wanddikte beton scharnierend					
100 mm	1,21	-	0,68	-	-
200 mm	1,16	-4,1	0,67	-1,5	-2,7
333 mm	1,17	-3,6	0,61	-10,3	6,7
Variërende vloerdikte beton ingeklemd					
100 mm	1,60	-	1,35	-	-
200 mm	0,76	-52,8	0,91	-32,6	-20,2
333 mm	0,81	-49,5	0,74	-45,2	-4,3
Variërende overspanning CLT					
5,4 m	0,83	-	0,55	-	-
3,6 m	0,79	-4,6	0,97	76,4	-80,9
7,2 m	0,26	-68,7	0,12	-78,2	9,5
Variërende overspanning beton scharnierend					
5,4 m	1,21	-	0,68	-	-
3,6 m	0,32	-34,9	0,83	22,1	-56,9
7,2 m	0,36	-69,9	0,32	-52,9	-17,0
Variërende overspanning beton ingeklemd					
5,4 m	1,60	-	1,35	-	-
3,6 m	0,32	-79,9	0,32	-76,3	-3,6
7,2 m	0,44	-72,7	0,21	-84,4	11,7
Tussenwanden CLT					
geen tussenwanden	0,83	-	0,55	-	-
Configuratie 1: doorlopend	1,25	50,2	0,28	-49,1	99,3
Configuratie 2: verspringen	1,82	118,8	0,50	-9,1	127,9

Tabel I.2: Relatie tussen de kwantitatieve voorspelling en de toetsing van trillingshinder aan de hand van de SBR.