

Trillingsonderzoek hoogbouwkavel Leidsche Rijn Centrum

Onderzoek spoortrillingen op
nieuwbouwplan MARK

Status	definitief
Versie	002
Rapport	B.2018.0399.52.R001
Datum	20 mei 2020



Colofon

Opdrachtgever	Gemeente Utrecht Ontwikkelorganisatie Ruimte Postbus 8613 3503 RP Utrecht
Contactpersoon opdrachtgever	[REDACTED]
Project	[REDACTED] Nieuwbouw hoogbouwkavel Leidsche Rijn Noord
Betreft	Trillingen
Uw kenmerk	-
Rapport	B.2018.0399.52.R001
Datum	20 mei 2020
Versie	002
Status	definitief
Uitgevoerd door	DGMR Bouw B.V. Van Pallandtstraat 9-11 6814 GM Arnhem Postbus 153 6800 AD Arnhem
Contactpersoon	[REDACTED] [REDACTED] [REDACTED]
Auteur	[REDACTED] [REDACTED] [REDACTED]
Projectadviseur	[REDACTED] [REDACTED] [REDACTED]
2e lezer/secr.	[REDACTED]

Inhoud

1. Inleiding	4
2. Situatie	5
2.1 Project	5
2.2 Spoor	6
3. Toetsingskader	7
4. Metingen	8
4.1 Meetomstandigheden	8
4.2 Meetpunten	8
4.3 Meetapparatuur	9
4.4 Verwerking meetresultaten	9
5. Resultaten	10
5.1 Trillingsmetingen	10
5.2 Overdrachtsmetingen	11
6. Prognose	12
7. Conclusie	13

Bijlagen

Bijlage 1	Trillingsregistraties V_{top}
Bijlage 2	Prognose kavel MARK

1. Inleiding

In opdracht van gemeente Utrecht heeft DGMR Bouw B.V. onderzoek gedaan naar spoortrillingen op het nieuwbouw plan 'MARK' gelegen op de hoogbouwkavel Leidsche Rijn Centrum (LRC). Het dichtstbijzijnde spoor ligt op ongeveer 60 meter van de bouwlocatie. Onderzocht is of de van het spoor afkomstige trillingen in de geplande nieuwbouw voldoen aan de daarvoor geldende richtlijnen.

Om inzicht te krijgen in de trillingsrisico's zijn op drie posities in de bodem op de kavel trillingen gemeten. Aanvullend hierop zijn gelijktijdig ook metingen gedaan aan de nabij het spoor staande parkeergarage van Capgemini en in de bodem naast deze parkeergarage. Dit om inzicht te krijgen in de trillingsoverdracht van bodem naar gebouw op deze locatie.

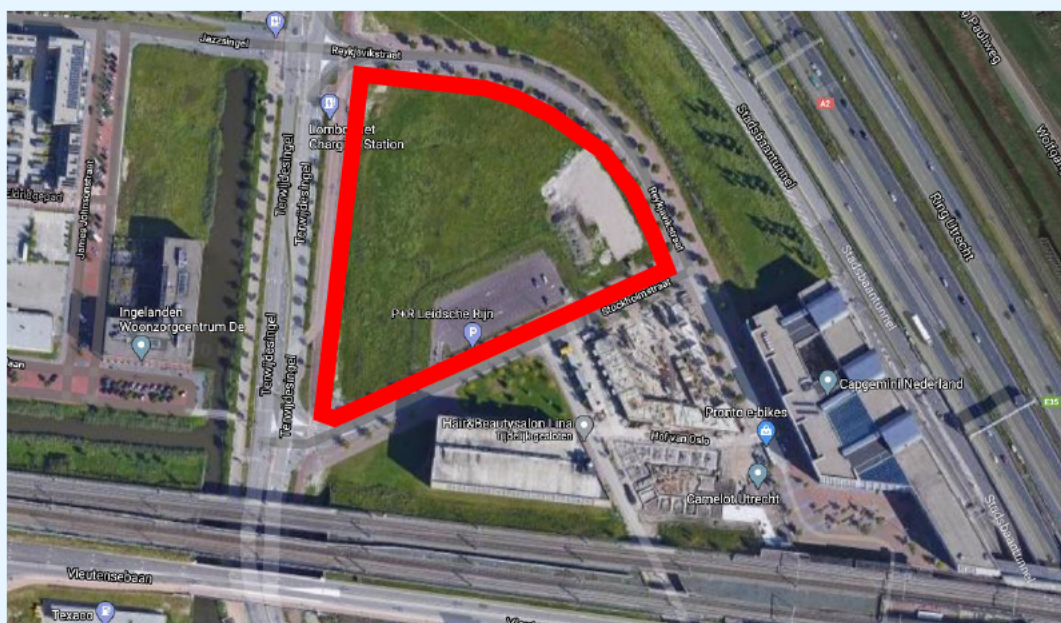
Op basis van de resultaten van deze metingen is een prognose gemaakt van de te verwachten trillingen in de nieuwbouw en worden randvoorwaarden gegeven voor het ontwerp om te kunnen voldoen aan de SBR-richtlijn Trillingen, deel B.

2. Situatie

2.1 Project

Hoogbouwkavel LRC omvat de herontwikkeling van een kavel aan de noordkant van station Utrecht Leidsche Rijn. De kavel ligt omsloten door de A2, de spoorlijn Utrecht - Woerden en de Terwijdesingel. De afstand tot de maatgevende trillingsbron, de spoorlijn, varieert tussen 60 en 220 meter. De kavel heeft een min of meer driehoekige vorm (taartpunt).

Het voorliggende plan MARK bestaat uit een plint met van 7 bouwlagen boven met daarop drie torens. Twee torens hebben een hoogte van 24 bouwlagen (circa 77m) en één toren bestaat uit 42 bouwlagen (circa 132 m hoog). Figuur 2 toont een 'artist impression' van de mogelijke invulling.



figuur 1: hoogbouwkavel 'MARK' (rood omcirkeld)

bron: Google Maps



figuur 2: mogelijke invulling hoogbouwkavel MARK

2.2 Spoor

Hoogbouwkavel LRC ligt ten noorden van station Utrecht Leidsche Rijn, aan de spoorlijn Utrecht - Den Haag/Rotterdam. Er passeren intercity's, sprinters en soms een goederentrein. Alleen de sprinters stoppen op dit station.

De treinen naar het oosten rijden over de twee zuidelijke sporen. De treinen richting het westen rijden over de meest nabije twee noordelijke sporen, zie figuur 3. De doorgaande reizigerstreinen rijden met snelheden tot circa 130 km/u. De goederentreinen met snelheden tot circa 90 km/u. De snelheid van de op station Leidsche Rijn stoppende sprinters ligt zeer laag.



figuur 3: Station LRC met intercity richting het westen

3. Toetsingskader

Op het project MARK is de ambitie van de gemeente Utrecht om te voldoen aan de SBR-richtlijn trillingen, deel B: 'Trillingshinder voor personen in gebouwen' van toepassing. De optredende trillingen worden beoordeeld volgens de SBR-B, uitgave 2002 (revisie 2006). In deze richtlijn zijn de in tabel 1 weergegeven streefwaarden opgenomen voor trillingen.

tabel 1: SBR-B - Streefwaarden continue en herhaald voorkomende trillingen, nieuwe situaties

Gebouwfunctie	Dag en avond			Nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Wonen	0,1	0,4	0,05	0,1	0,2	0,05

A1 = onderste streefwaarde voor de trillingssterkte V_{max} ; A2 = bovenste streefwaarde voor de trillingssterkte V_{max} ;

A3 = streefwaarde voor de gemiddeld effectieve waarde over de beoordelingsperiode V_{per} , indien $A1 < V_{max} < A2$.

Nieuwe woongebouwen nabij een weg of spoorlijn voldoen aan de SBR-B als de maximale effectieve trillingssterkte V_{max} kleiner is dan 0,2 (nachtperiode) en de gemiddelde trillingssterkte V_{per} niet hoger dan 0,05. Als V_{max} kleiner is dan 0,1, komt de toetsing van de V_{per} te vervallen.

Als ook na het treffen van maatregelen het niet mogelijk of haalbaar blijkt om te voldoen aan het toetsingskader voor 'nieuwe situaties' dan kan de gemeente overschrijding toestaan tot maximaal het toetsingskader voor 'bestaande situaties'.

4. Metingen

4.1 Meetomstandigheden

Conform de aanbevelingen in de SBR-B is een meetperiode van een week aangehouden om variaties in spoorgebruik en materieel mee te nemen in de metingen. De metingen zijn uitgevoerd tussen 14 en 21 april 2020.

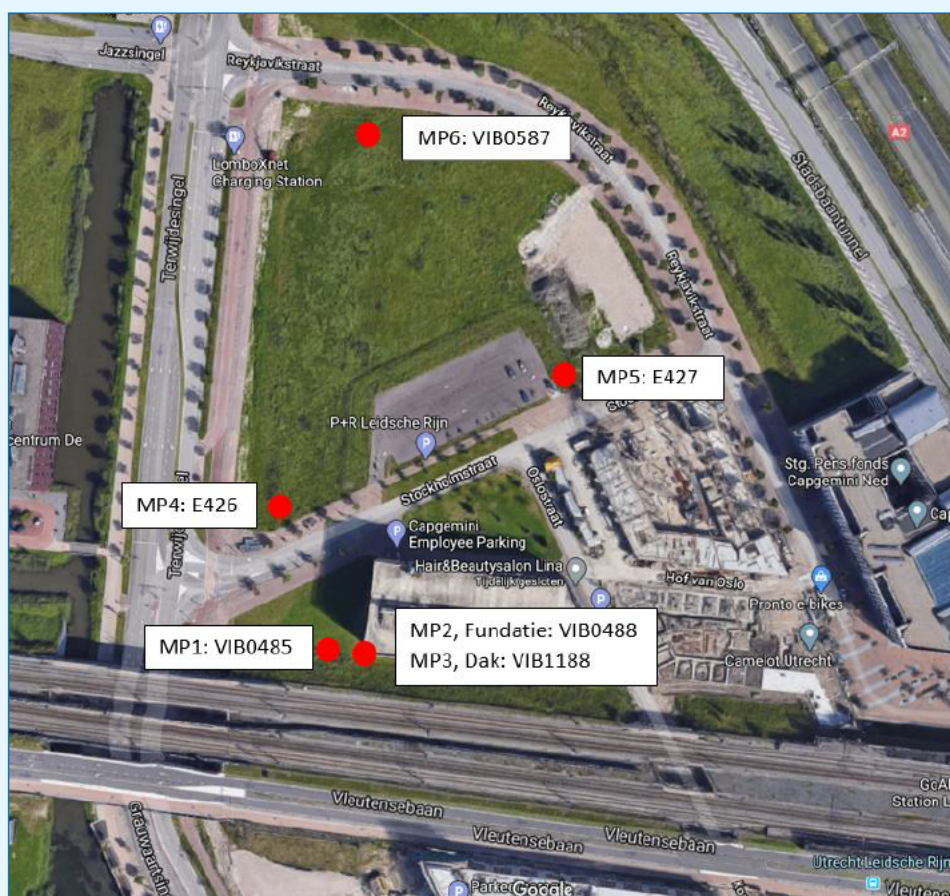
Tijdens de meetperiode was er een aangepaste dienstregeling vanwege Corona-maatregelen.

Er reden minder treinen dan normaal, maximaal twee intercity's en twee sprinters per uur.

Ook reden er mogelijk minder goederentreinen. Het afwijkende aantal kan invloed hebben op de bepaling van de maximale trillingssterkte V_{max} , maar verwacht wordt dat het aantal passages nog voldoende is voor een representatief beeld. Ook de bezettingsgraad in reizigerstreinen is minder dan voorheen, maar dat heeft op de trillingsopwekking zeer beperkte invloed.

4.2 Meetpunten

Er zijn metingen uitgevoerd op drie posities op de kavel, één positie in de bodem naast de parkeergarage van CapGemini en op twee posities aan deze parkeergarage, zie figuur 4. Aan de parkeergarage is gemeten op constructief stijve punten op de begane grond en op het dak, zodat ook inzicht wordt verkregen in de trillingsoverdracht naar verdiepingen. Alle meetsystemen in de bodem zijn ingegraven op ongeveer 50 cm diepte.



figuur 4: meetposities

4.3 Meetapparatuur

In tabel 2 is een overzicht gegeven van de gebruikte meetsystemen.

tabel 2: meetlocaties en systemen

Meetpunt	Locatie	Meetsysteem	Serienummer
Mp1	Bodem, 20 m vanaf het spoor	Profound Vibra SBR	VIB0485
Mp2	Fundatie parkeergarage	Profound Vibra SBR	VIB0488
Mp3	Dak, parkeergarage	Profound Vibra SBR	VIB1188
Mp4	Bodem, 67m vanaf het spoor	Profound Vibra SBR	VIBe426
Mp5	Bodem, 130m vanaf het spoor	Profound Vibra SBR	VIBe427
Mp6	Bodem, 210m vanaf het spoor	Profound Vibra SBR	VIB0587

4.4 Verwerking meetresultaten

In de meetperiode werd de bouwkavel nog gebruikt als parkeerplaats, opslag voor de bouw en er stond ook een bouwkeet. Deze invulling in combinatie met de wegen rondom de kavel zorgen ervoor dat de meetdata wordt verstoord door passanten en allerlei verkeersbewegingen. Om alleen de invloed van treinpassages, dus vrij van verstoring, in beeld te brengen zijn treinpassages in de trillingsregistraties geïdentificeerd op basis van camerabeelden (spoorgerichte camera). Als er in de registraties verstoringen zichtbaar zijn van vergelijkbare of hogere amplitude als de treinpassage, dan is deze treinpassage niet verder beschouwd.

De meetsystemen meten de maximale trillingssterkte V_{top} en de voor trillinghinder maatgevende effectieve trillingssterkte V_{eff} . De V_{eff} wordt slechts gemeten in 30 seconden intervallen volgens de SBR-B. Voor identificatie van treinpassages is dit te grof. De identificatie van treinen en de check op verstoringen geschiedt aan de hand van het trillingssignaal V_{top} dat een 10x hogere resolutie heeft. Van de geïdentificeerde treinpassages die vrij zijn van verstoring, is de bijbehorende effectieve trillingssterkte $V_{eff,max}$ geselecteerd voor verdere analyse en prognose. De hoogste waarde daarvan is de maatgevende V_{max} volgens de SBR-B richtlijn.

5. Resultaten

5.1 Trillingsmetingen

Bijlage 1 geeft een overzicht van de trillingsregistraties en eventuele verstoringen gedurende een week meten. Afgebeeld is de trillingssterkte V_{top} die, zoals in paragraaf 4.4 is omschreven, wordt gebruikt voor de identificatie van treinpassages. Uit de onderliggende registraties van de V_{eff} is vervolgens de top-15 treinpassages geselecteerd en statistisch verwerkt volgens de in de SBR-B aangegeven methodiek. Tabellen 3 en 4 tonen de top-15 (effectieve) trillingssterkten $V_{eff,max}$ voor de parkeergarage en de hoogbouwkavel. De passages zijn aflopend gerangschikt op de trillingssterkte in verticale richting van Mp1.

tabel 3: trillingssterkten $V_{eff,max}$ (top-15) - Parkeergarage CapGemini

Top-15		Mp1 (20 m) - bodem			Mp2 - fundatie			Mp3 - dak		
		X*	Y*	Z*	X	Y	Z	X	Y	Z
1	Goederentrein	0,10	0,11	0,21	0,08	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10
2	IC	0,14	0,15	0,19	0,08	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
3	IC	0,10	0,12	0,18	0,06	0,10	0,07	0,10	0,08	0,10
4	IC	0,12	0,16	0,18	0,06	0,10	0,08	0,10	0,10	0,09
5	IC	0,11	0,14	0,17	0,08	0,10	0,08	0,10	0,09	0,10
6	IC	0,19	0,15	0,17	0,10	0,11	0,08	0,11	0,10	0,09
7	IC	0,15	0,18	0,16	0,09	0,10	0,08	0,10	0,10	0,09
8	IC	0,10	0,10	0,16	0,09	0,10	0,09	0,10	0,08	0,08
9	IC	0,17	0,17	0,16	0,10	0,10	0,09	0,11	0,10	0,10
10	IC	0,11	0,13	0,15	0,06	0,09	0,07	0,10	0,10	0,07
11	IC	0,12	0,12	0,15	0,07	0,10	0,07	0,10	0,10	0,09
12	IC	0,12	0,14	0,15	0,07	0,10	0,08	0,10	0,10	0,10
13	Goederentrein	0,10	0,10	0,15	0,06	0,07	0,06	0,10	0,09	0,08
14	Locomotief	0,10	0,09	0,15	0,10	0,07	0,05	0,06	0,06	0,09
15	IC	0,15	0,18	0,14	0,10	0,10	0,09	0,10	0,10	0,10
Aantal passages (n)		15								
Gemiddelde (μ)		0,13	0,14	0,16	0,08	0,10	0,08	0,10	0,09	0,09
Standaarddeviatie (σ)		0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
$V_{eff,max,stat}$		0,19	0,20	0,20	0,11	0,12	0,11	0,12	0,12	0,11

* X-richting $\perp$ spoor, Y-richting // spoor en Z-richting verticaal

tabel 4: trillingssterkten $V_{eff,max}$ (top-15) in de bodem

Top-15		Mp4 (67 m)			Mp5 (130m)			Mp6 (210m)		
		X*	Y*	Z*	X	Y	Z	X	Y	Z
1	Goederentrein	0,09	0,10	0,20	0,08	0,05	0,10	0,05	0,05	0,04
2	IC	0,07	0,09	0,10	0,04	0,04	0,10	0,04	0,04	0,03
3	IC	0,08	0,10	0,10	0,04	0,03	0,06	0,04	0,03	0,03
4	IC	0,07	0,09	0,10	0,06	0,05	0,09	0,06	0,04	0,04
5	IC	0,10	0,11	0,11	0,06	0,04	0,10	0,06	0,05	0,04
6	IC	0,09	0,10	0,10	0,06	0,05	0,08	0,04	0,05	0,04
7	IC	0,10	0,10	0,10	0,05	0,06	0,07	0,05	0,06	0,05
8	IC	0,08	0,10	0,09	0,04	0,04	0,09	0,06	0,05	0,03
9	IC	0,10	0,12	0,10	0,05	0,05	0,08	0,05	0,05	0,05
10	IC	0,09	0,10	0,09	0,05	0,05	0,07	0,04	0,04	0,04
11	IC	0,09	0,10	0,10	0,04	0,04	0,10	0,04	0,04	0,03
12	IC	0,08	0,11	0,10	0,07	0,04	0,08	0,05	0,04	0,04
13	Goederentrein	0,06	0,06	0,13	0,05	0,04	0,05	0,04	0,03	0,03
14	Locomotief	0,04	0,05	0,07	0,02	0,02	0,04	0,03	0,03	0,02
15	IC	0,08	0,12	0,10	0,05	0,05	0,09	0,05	0,05	0,04
Aantal passages (n)		15								
Gemiddelde (μ)		0,08	0,10	0,11	0,05	0,04	0,08	0,05	0,04	0,04
Standaarddeviatie (σ)		0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
$V_{eff,max,stat}$		0,12	0,14	0,17	0,08	0,06	0,12	0,07	0,06	0,05

* X-richting $\perp$ spoor, Y-richting // spoor en Z-richting verticaal

Beschouwing

De camerabeelden laten zien dat de treinen in de top-15 voornamelijk intercity's zijn die naar het westen rijden. Er zitten maar enkele goederentreinen en losse locomotieven tussen.

De trillingsafname (in de bodem) met toenemende afstand tot het spoor, is voor goederentreinen veel minder dan voor reizigerstreinen. De goederentreinen rijden circa 90 km/u en zijn langzamer dan de intercity's die met ongeveer 130 km/u passeren. De passage van de goederentreinen duurt langer en deze wekken ook frequenties op die door de bodem beter worden overgedragen.

Op meetpunt Mp4, op 67 m afstand van het spoor, is de trillingsafname ten opzichte van Mp1 (20 m) een factor 1,5 à 2 voor reizigerstreinen, maar slechts 10 tot 20% voor goederentreinen. Op Mp5 (130 m) en Mp6 (210 m) zijn nauwelijks nog trillingen van treinen waarneembaar.

In de bodem is de verticale meetrichting dominant. Bovenop de parkeergarage van CapGemini (Mp3) is echter de X-richting (haaks op het spoor) dominant. In de parkeergarage zijn verder slechts enkele treinpassages gemeten die tot net voelbare trillingen hebben geleid.

5.2 Overdrachtsmetingen

Overdracht bodem naar gebouwfundatie

In tabel 5 zijn de gemeten overdrachten (in dB) van bodem naar gebouw (parkeergarage) weergegeven. Alleen tussen globaal 4 Hz en 10 Hz zijn de overdrachten betrouwbaar, omdat alleen bij deze frequenties er voldoende energie afkomstig van treinen is. Van 4 tot 10 Hz neemt de verzwakking in verticale richting geleidelijk toe, maar horizontaal is deze redelijk constant.

tabel 5: overdracht bodem naar gebouw (o.b.v. meetdata parkeergarage Capgemini) in [dB]

Frequentie [Hz]	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5
Horizontaal	-4	-8	-6	-6	-5	-7	-4	-5	-10	-5	-6
Verticaal	4	-1	-1	-7	-6	-11	-9	-7	-7	-11	-13

In rood aangegeven getallen minder betrouwbaar wegens onvoldoende trillingssterkte

Overdracht van fundatie naar dak

Naast de overdracht van bodem naar gebouw is ook gekeken naar de overdracht van de gebouw-fundatie naar het bovenste dek van de parkeergarage. Ook hier geldt dat er alleen tussen 4 Hz en 10 Hz voldoende trillingsenergie van treinen is voor het bepalen van een goede overdracht.

In tabel 6 staan de gemeten overdrachten van fundatie naar het dak van de parkeergarage.

tabel 6: overdracht gebouwfundatie naar dak (o.b.v. data parkeergarage Capgemini) in [dB]

Frequentie [Hz]	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5
Horizontaal	15	18	14	8	-6	6	-4	-1	-2	-3	-6
Verticaal	5	5	0	2	1	0	3	3	4	6	6

Tabel 6 laat zien dat er tussen 3 en 5 Hz trillingsversterking optreedt in de gebouwconstructie. Vermoedelijk betreft het een eigenfrequentie waarbij de constructie in de X-richting (haaks op het spoor) een kantelbeweging uitvoert op de fundering. De hoogbouw van MARK is veel hoger en zwaarder en deze primaire eigenfrequentie van de draagconstructie verschuift dan naar een veel lagere frequentie, vermoedelijk zelfs ruim onder 1 Hz. In dat frequentiegebied wekken treinen geen noemenswaardige trillingen op en zal er in de praktijk ook geen grote versterking optreden. Daarnaast neemt de gevoeligheid van de mens voor dergelijke lage frequenties af en worden deze in de bepaling van de effectieve trillingssterkte conform de SBR-B sterk afgewaardeerd. Voor de drie torens van MARK is daarom geen rekening te houden met dit verschijnsel, maar voor het lagere plintdeel mogelijk wel. Voor de plint wordt gerekend met de bepaalde overdrachten uit tabel 5 en tabel 6.

6. Prognose

Om inzicht te krijgen in de te verwachten trillingssterkten in toekomstige bebouwing is, op basis van de gemeten trillingssterkten op de kavel en de bepaalde overdrachten aan de parkeergarage, een empirisch rekenmodel opgezet. Voor de lagere plintbebouwing worden de overdrachten zoals bepaald voor de parkeergarage aangehouden. Voor de hoogbouw (torens) worden aangepaste overdrachten toegepast, vanwege de veel hogere bouwmassa's en verwacht zeer lage primaire eigenfrequenties van de gebouwconstructie. De prognoses zijn opgesteld voor zowel de verticale alsook de maatgevende horizontale richting.

Bijlage 2 toont de prognoseberekeringen voor het plintdeel en voor een woontoren van 44 bouwlagen, in zowel de maatgevende horizontale richting alsook de verticale richting. Voor de woontorens van 24 bouwlagen kan de prognose voor die van 44 bouwlagen aangehouden worden. De prognose geldt voor goederentreinen en bebouwing op de minimale bouwafstand van 60 meter tot het spoor. Voor reizigerstreinen geldt dat deze naar verwachting in het geheel geen voelbare trillingen opwekken.

Voor de V_{per} berekening is uitgegaan van één goederentrein per uur, waarvan de trillingssterkte hoger is dan 0,1. Op dagbasis is dat zeer veel meer dan er nu rijdt, maar dit is het minimumaantal waarop nog een V_{per} -berekening is uit te voeren. In tabel 7 een overzicht van de geprognosticeerde trillingssterkten.

tabel 7: trillingsprognose (V_{max}/V_{per}) nieuwbouw - goederentreinen

Richting	Trillingssterkte V_{max} (V_{per}) op 60 m van het spoor	
	Plint 7 bouwlagen	Toren 24 - 44 bouwlagen (77 - 137m)
Horizontaal	0,14 (< 0,01)	0,08 (--)
Verticaal	0,08 (--)	0,10 (--)

Beschouwing

Uit tabel 7 blijkt dat er op de minimale bouwafstand van 60 meter tot het spoor al wordt voldaan aan de SBR-B. De trillingssterkten V_{max} en V_{per} blijven voor alle voorziene bouwdelen ruim onder de streefwaarden A2(0,2) en A3 (0,05). Omdat er slechts incidenteel (goederen)treinen passeren die nog tot voelbare trillingen kunnen leiden (in de plint), is de bepaling van de gemiddelde trillingssterkte V_{per} hier nauwelijks relevant.

Op meer dan 100 m afstand van het spoor, waar zich het grootste deel van de nieuwbouw bevindt, zijn zelfs helemaal geen voelbare trillingen te verwachten en wordt zelfs voldaan aan de onderste streefwaarde A1.

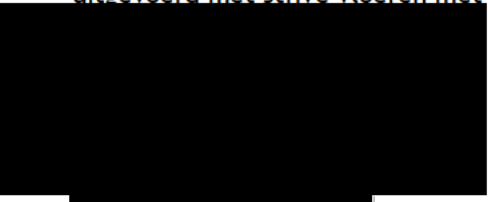
In de prognose is uitgegaan van een betonnen draagconstructie, relatief stijve vloeren en een paalfundering. Met een staalconstructie kunnen licht hogere trillingssterkten aan de orde zijn vanwege de doorgaans wat lagere demping van de staalconstructie. Ook bij vloeren met grote overspanningen en een laagste eigenfrequentie in het gebied van 4 tot 10 Hz zijn hogere trillingssterkten te verwachten. Geadviseerd wordt om in woongebouwen op minder dan 100 m van het spoor, vloeren met een laagste buig-eigenfrequentie van ongeveer 12 Hz toe te passen.

7. Conclusie

Uit de trillingsmetingen op de bouwkavel, de overdrachtsmetingen aan de parkeergarage en de daarop gebaseerde prognoses blijkt dat het huidige spoorgebruik naar verwachting niet tot trillinghinder leidt in de nieuwbouw op hoogbouwkavel MARK.

Uitgangspunt in de prognoses is dat er voor woongebouwen een betonnen draagconstructie wordt toegepast en vloeren met een stijfheid zodanig dat de laagste buig-eigenfrequentie tenminste 12 Hz bedraagt. In dat geval treden hooguit nog net voelbare trillingen op in bebouwing van minder dan acht bouwlagen en voor zover deze zich bevinden op minder dan 100 m afstand tot het spoor. Er wordt dan ruim voldaan aan de streefwaarden uit de SBR-B voor woonfuncties.

Bij gebouwen met een stalen draagconstructie zijn trillingssterkten mogelijk licht hoger vanwege de lagere demping van zo'n constructie. Verwacht wordt dat de trillingssterkten ook in dat geval nog voldoen aan de SBR-B, zolang woongebouwen op minder dan 100 m van het spoor maar worden uitgevoerd met stijve vloeren met een laagste (buig)eigenfrequentie van circa 12 Hz.

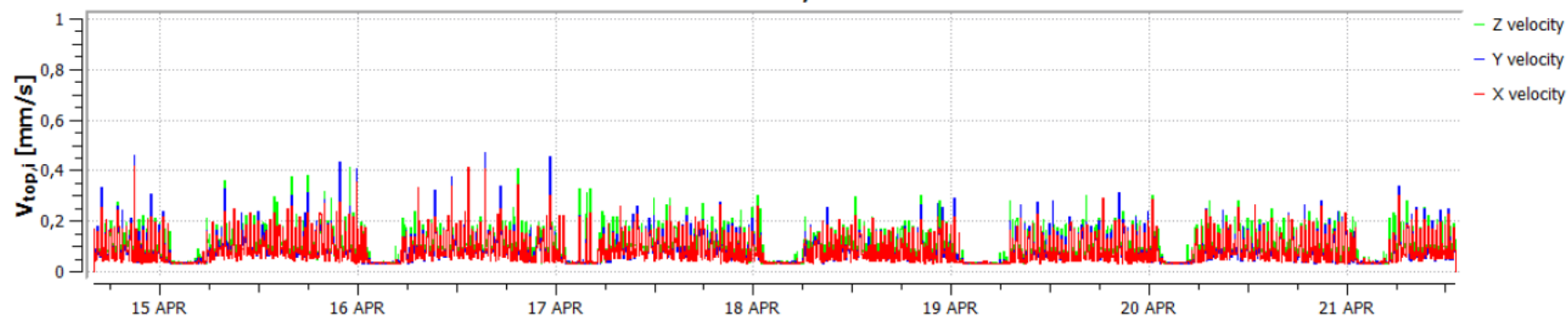


DGMR Bouw B.V.

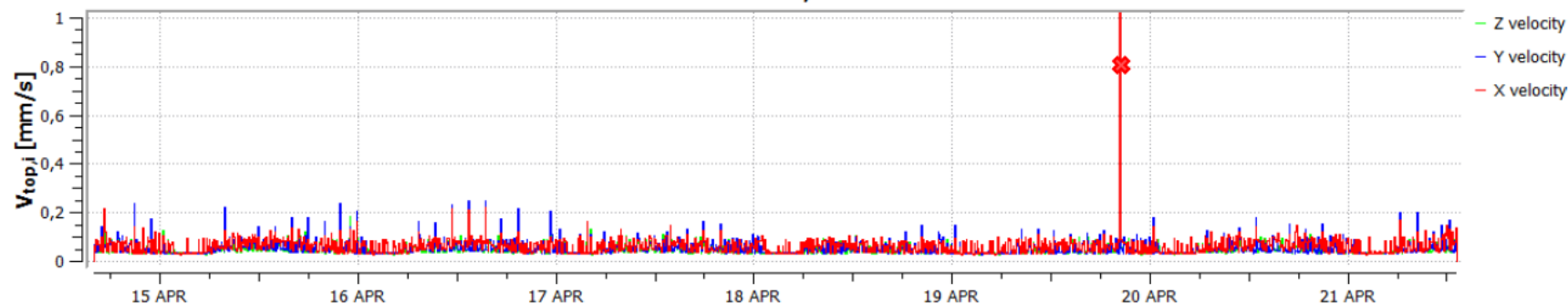
Bijlage 1

Titel	Trillingsregistraties V_{top}
-------	--

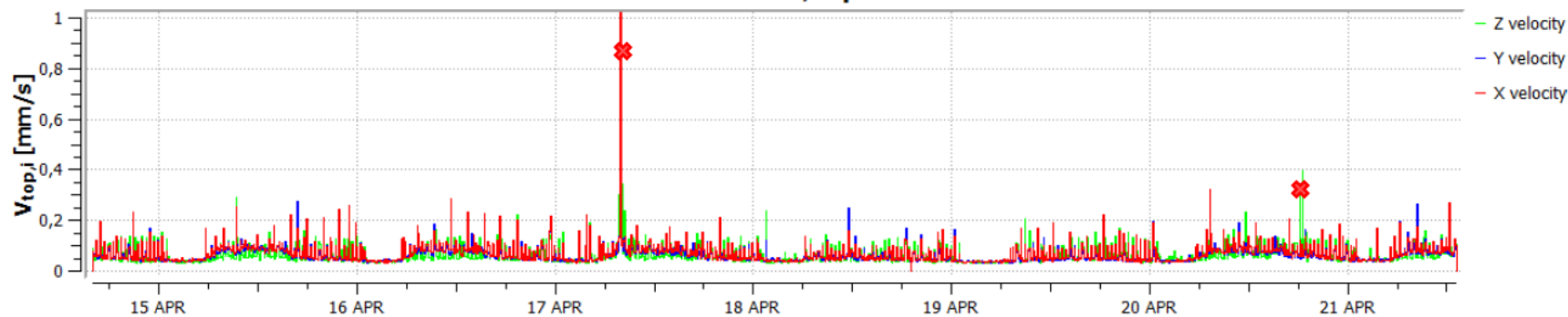
VIB00485, MP1



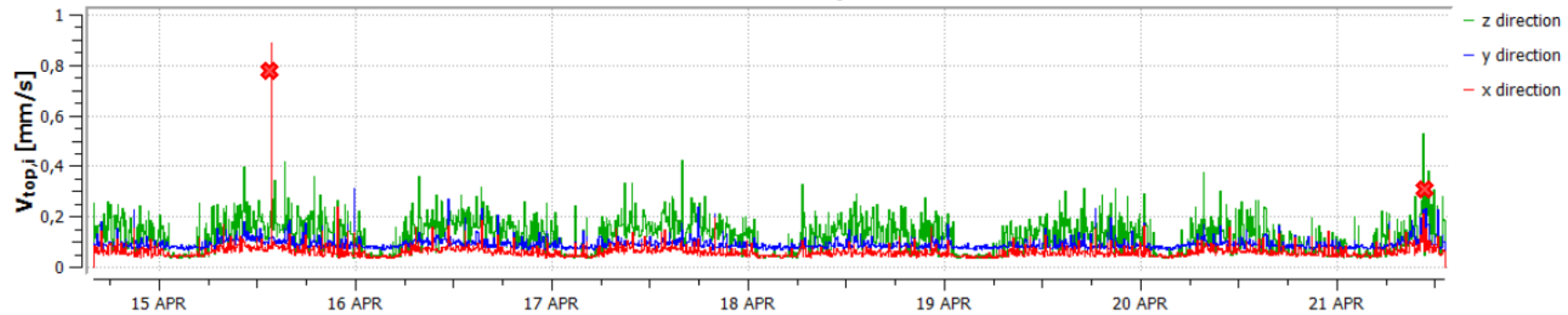
VIB00488, MP2



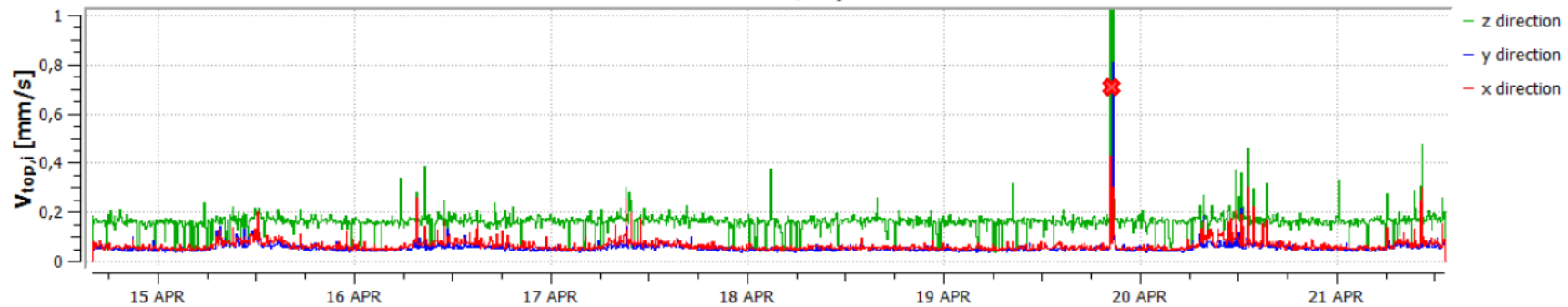
VIB01188, Mp3



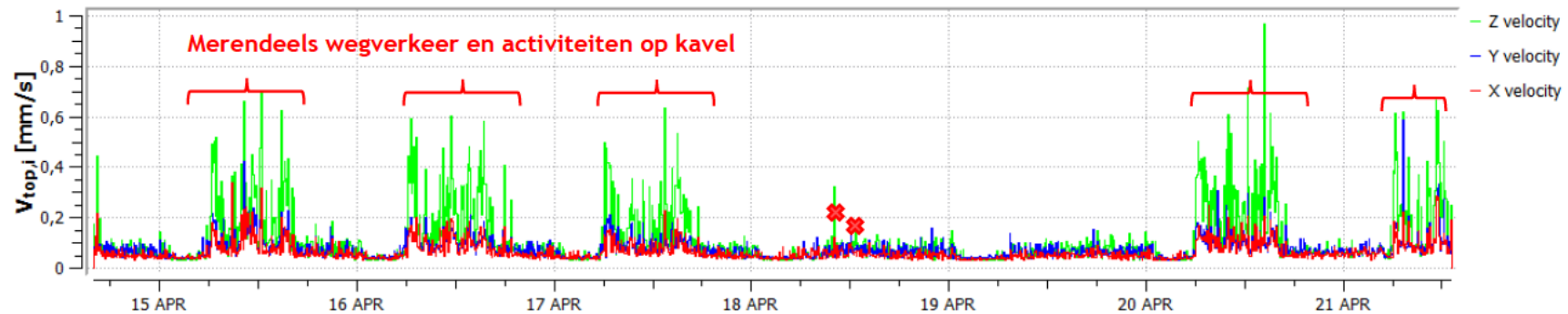
VIBe0426, Mp4



VIBe0427, Mp5



VIB00587, MP6



Bijlage 2

Titel	Prognose kavel MARK
-------	---------------------

Z

Trillingsprognose railverkeer

project MARK, Utrecht
 gebouwtype Plint
 gebouwafstand (tot spoor) 60 m

bronspectrum Goederentrein 15-4-2020 23:03
 vormfactor C_v 0,65 (verhouding V_{rms}/V_{uap})
 referentieafstand 20 m

passages per uur 1 (alleen $V_{eff} > 0,1$)
 peiljaar 2020
 rijsnelheid 90 km/u
 referentie snelheid 90 km/u

Bodemtrillingen

1/3-octaf	1	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	som
bronspectrum (rms, gem)					72	89	82	91	100	102	98	89	90	80	81	78	79	72	72	77	73				106
spreiding					3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0				
bronspectrum (rms, max)					75	92	85	94	103	105	101	92	93	83	84	81	82	75	75	80	76				109
snelheidscorrectie																									
geen																									
afstandscorrectie					-4,5	-3,7	-3,1	-2,8	-2,8	-2,8	-2,8	-2,8	-2,8	-3,3	-4,1	-5,2	-6,5	-8,2	-10,3	-13,1	-15,6				
L_v [dB]					71	88	82	91	100	102	98	90	90	80	80	75	75	67	65	66	60				106
V_{rms} [mm/s]					0,00	0,03	0,01	0,03	0,10	0,13	0,08	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00				0,19
																									0,30

SBR-A / Gebouwschade

Stijf punt fundatie	gebouwtype:	User defined 1	Vert, meting P-garage																						
$H_{v,1}$ [dB]				-0,9	3,9	-0,9	-1,3	-6,9	-6,3	-10,5	-9,3	-6,8	-6,8	-10,7	-12,5	-10,1	-7,9	-8,5	-5,3	0,9					
L_v [dB]				70	92	81	90	94	96	87	80	83	73	69	63	65	59	56	61	61					100
V_{rms} [mm/s]				0,00	0,04	0,01	0,03	0,05	0,06	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					0,10
																									0,15

SBR-C / Verstoring van apparatuur (v_{rms})

BEGANE GROND / Versoring van apparatuur (v_{rms})																				
Begane grond	vloertype:	vloertype 3 ($f_0 = 10-20$ Hz)																		
$H_{v,300}$		0,7	0,8	1,1	1,5	2,1	3,2	5,1	6,8	8,0	7,6	7,0	6,4	5,8	5,1	4,1	3,2	2,3		
L_v [dB]		71	93	82	91	96	99	93	87	91	81	76	69	71	64	60	64	64		103
v_{rms} [mm/s]		0,00	0,04	0,01	0,04	0,06	0,09	0,04	0,02	0,04	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,14
																			v_{rms}	0,21

4e verdieping	vloertype:	vloertype 3 (f ₀ = 10-20 Hz)																			%rap	0,24
H _{v,3} [dB]		3,0	3,2	3,1	0,0	1,4	0,7	0,0	1,8	2,0	2,3	3,3	3,7	3,0	3,2	2,7	5,1	8,6				
H _{v,300} [dB]		0,7	0,8	1,1	1,5	2,1	3,2	5,1	6,8	8,0	7,6	7,0	6,4	5,8	5,1	4,1	3,2	2,3				
L _v [dB]		74	96	86	91	97	100	93	89	93	83	79	73	74	67	63	69	72		104		
V _{rms} [mm/s]		0,00	0,06	0,02	0,04	0,07	0,10	0,04	0,03	0,05	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00		0,16		
																				0,24		

7e verdieping	vloertype:	vloertype 3 (f ₀ = 10-20 Hz)																			
H _{v,3} [dB]		5,3	5,5	5,5	0,0	2,4	1,1	0,0	3,2	3,4	4,0	5,7	6,5	5,3	5,7	4,8	9,0	15,0			
H _{v,skier} [dB]		0,7	0,8	1,1	1,5	2,1	3,2	5,1	6,8	8,0	7,6	7,0	6,4	5,8	5,1	4,1	3,2	2,3			
L _v [dB]		76	98	88	91	98	100	93	90	95	85	82	76	76	70	65	73	79		105	
V _{rms} [mm/s]		0,01	0,08	0,02	0,04	0,08	0,10	0,04	0,03	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01		0,18	
																				0,27	

SBR-B / Hinder voor personen (v_{eff})

Begane grond	gebouwtype:	User defined 1	Vert, meting P-garage																						
SBR-veeqing				-15,1	-13,2	-11,2	-9,5	-7,8	-6,1	-4,7	-3,5	-2,5	-1,7	-1,2	-0,8	-0,5	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
L_v [dB]				63	87	78	88	93	97	91	86	91	80	76	69	71	64	60	64	64					101
$V_{eff,max}$ [mm/s]				0,00	0,02	0,01	0,02	0,05	0,07	0,04	0,02	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					0,007
																									0,008

4e verdieping																									
L_v [dB]					66	90	81	88	95	98	91	88	93	83	79	73	74	67	63	69	72				102
$V_{eff,max}$ [mm/s]					0,00	0,03	0,01	0,02	0,05	0,08	0,04	0,03	0,04	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00				0,012
																									0,008

7e verdieping																									
L_v [dB]					68	92	83	88	96	98	91	90	94	84	82	76	76	70	65	73	79				103
$V_{eff,max}$ [mm/s]					0,00	0,04	0,01	0,02	0,06	0,08	0,04	0,03	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01				0,014
																									0,009

**Trillingsprognose railverkeer**

project	MARK, Utrecht	bronspectrum	Goederentrein 15-4-2020 23:03	passages per uur	1	(alleen $V_{eff} > 0,1$)
gebouwtype	Plint	vormfactor C_v	0,65 (verhouding V_{rms}/V_{oep})	peiljaar	2020	
gebouwfstand (tot spoor)	60 m	referentieafstand	20 m	rijnsnelheid	90 km/u	
				referentie snelheid	90 km/u	

Bodemtrillingen

1/3-octaf	1	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	som
bronspectrum (rms, gem)					76	88	84	86	93	93	90	87	87	81	77	82	75	71	71	72	67				99
spreiding					3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0				
bronspectrum (rms, max)					79	91	87	89	96	96	93	90	90	84	80	85	78	74	74	75	70				102
snelheidscorrectie																									
geen																									
afstandscorrectie					-4,5	-3,7	-3,1	-2,8	-2,8	-2,8	-2,8	-2,8	-2,8	-3,3	-4,1	-5,2	-6,5	-8,2	-10,3	-13,1	-15,6				
L_v [dB]					75	87	83	86	93	93	91	87	88	81	76	80	71	66	64	62	55				99
V_{rms} [mm/s]					0,01	0,02	0,01	0,02	0,04	0,05	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				0,09
																									V_{oep}
																									0,14

SBR-A / Gebouwschade

Stijf punt fundatie	gebouwtype:	User defined 2										Hor, meting P-garage									
H _{v,1} [dB]		-0,8	-4,0	-7,6	-5,7	-6,2	-4,5	-6,8	-3,6	-4,8	-10,1	-5,3	-5,5	-2,9	-3,4	-5,3	3,3	4,7			
L _v [dB]		74	83	76	81	87	89	84	84	83	71	71	74	68	62	59	65	59		94	
V _{rms} [mm/s]		0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,05	

SBR-C / Verstoring van apparatuur (v_{rms})

Begane grond		vloertype: user defined																				
H _{v,vloer}		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
L _v [dB]		74	83	76	81	87	89	84	84	83	71	71	74	68	62	59	65	59			94	
v _{rms} [mm/s]		0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			0,05	

4e verdieping	vloertype:	user defined																							
$H_{v,3}$ [dB]			9,1	8,5	10,2	8,2	4,5	-3,3	3,4	-2,0	-0,7	-1,2	-1,6	-3,4	-1,2	-0,3	-3,2	-1,6	-2,4						
$H_{v,vloer}$ [dB]			0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0						
L_v [dB]			83	92	86	89	91	86	87	82	82	70	69	71	67	62	56	63	57						97
V_{rms} [mm/s]			0,01	0,04	0,02	0,03	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00						0,07
																									V_{oep}
																									0,11

7e verdieping	vloertype:	user defined																							
$H_{v,3}$ [dB]			15,9	14,8	17,9	14,4	7,9	-5,8	5,9	-3,6	-1,3	-2,1	-2,9	-6,0	-2,1	-0,5	-5,7	-2,8	-4,2						
$H_{v,vloer}$ [dB]			0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0						
L_v [dB]			90	98	94	95	95	83	90	80	81	69	68	68	66	62	53	62	55						102
V_{rms} [mm/s]			0,03	0,08	0,05	0,06	0,05	0,01	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00						0,13
																									V_{oep}
																									0,20

SBR-B / Hinder voor personen (v_{eff})

Begane grond		gebouwtype:				User defined 2				Hor, meting P-garage															
SBR-weging		-15,1	-13,2	-11,2	-9,5	-7,8	-6,1	-4,7	-3,5	-2,5	-1,7	-1,2	-0,8	-0,5	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0		
L_v [dB]						66	77	71	77	84	87	83	83	82	71	71	74	68	62	59	65	59			92
$V_{eff,max}$ [mm/s]						0,00	0,01	0,00	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			0,00
																					V_{oep}^*				0,000

8e verdieping																									
L_v [dB]			75	86	81	85	89	84	86	81	81	70	69	71	67	62	56	63	57						94
$V_{eff,max}$ [mm/s]			0,01	0,02	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00						0,00
																									V_{oep}^*
																									0,000

7e verdieping																									
L_v [dB]			82	92	89	92	92	81	89	79	81	69	68	68	66	62	53	62	55						98
$V_{eff,max}$ [mm/s]			0,01	0,04	0,03	0,04	0,04	0,01	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00						0,00
																									V_{oep}^*
																									0,000

Trillingsprognose railverkeer

project MARK, Utrecht
 gebouwtype Woontoren, 44 bouwlagen
 oebouwafstand (tot spoor) 60 m

bronspectrum Goederentrein 15-4-2020 23:03
 vormfactor C_v 0,65 (verhouding V_{rms}/V_{top})
 referentieafstand 20 m

passages per uur 1 (alleen $V_{eff} > 0,1$)
 peiljaar 2020
 rijsnelheid 90 km/u
 referentie snelheid 90 km/u

Bodemtrillingen

1/3-octaf	1	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	som
bronspectrum (rms, gem)					72	89	82	91	100	102	98	89	90	80	81	78	79	72	72	77	73				106
spreadinq					3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0				109
bronspectrum (rms, max)					75	92	85	94	103	105	101	92	93	83	84	81	82	75	75	80	76				106
snelheidscorrectie																									0,19
geen																									0,30
afstandscorrectie					-4,5	-3,7	-3,1	-2,8	-2,8	-2,8	-2,8	-2,8	-2,8	-3,3	-4,1	-5,2	-6,5	-8,2	-10,3	-13,1	-15,6				106
L_v [dB]					71	88	82	91	100	102	98	90	90	80	80	75	75	67	65	66	60				0,19
V_{rms} [mm/s]					0,00	0,03	0,01	0,03	0,10	0,13	0,08	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00				0,30

SBR-A / Gebouwschade

Stijf punt fundatie	gebouwtype: Hoogbouw																								
$H_{v,1}$ [dB]					-6,0	-4,9	-3,2	-3,0	-7,3	-8,0	-8,0	-8,4	-9,0	-9,8	-10,8	-12,4	-15,1	-20,0	-20,0	-20,0	-20,0				
L_v [dB]					65	83	79	88	93	94	90	81	81	70	69	63	60	47	45	46	40				98
V_{rms} [mm/s]					0,00	0,01	0,01	0,02	0,05	0,05	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				0,08
																									0,13

SBR-C / Verstoring van apparatuur (v_{rms})

Begane grond	vloertype: vloertype 3																								
$H_{v,100}$ [dB]					0,7	0,8	1,1	1,5	2,1	3,2	5,1	6,8	8,0	7,6	7,0	6,4	5,8	5,1	4,1	3,2	2,3				102
L_v [dB]					65	84	80	89	95	97	95	88	89	78	76	69	66	52	49	50	43				0,12
V_{rms} [mm/s]					0,00	0,02	0,01	0,03	0,06	0,07	0,06	0,03	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				0,19

20e verdieping	vloertype: vloertype 3																								
$H_{v,100}$ [dB]					0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-3,1	-8,8	-14,5	-20,8	-26,5	-29,3	-29,3	-29,3	-29,3	-29,3	-29,3	-29,3				99
$H_{v,100}$ [dB]					0,7	0,8	1,1	1,5	2,1	3,2	5,1	6,8	8,0	7,6	7,0	6,4	5,8	5,1	4,1	3,2	2,3				0,09
L_v [dB]					65	84	80	89	95	94	86	74	68	51	47	40	37	23	20	20	13				0,13
V_{rms} [mm/s]					0,00	0,02	0,01	0,03	0,06	0,05	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				0,13

40e verdieping	vloertype: vloertype 3																								
$H_{v,100}$ [dB]					0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-6,3	-17,7	-29,0	-41,6	-53,0	-58,6	-58,6	-58,6	-58,6	-58,6	-58,6	-58,6				98
$H_{v,100}$ [dB]					0,7	0,8	1,1	1,5	2,1	3,2	5,1	6,8	8,0	7,6	7,0	6,4	5,8	5,1	4,1	3,2	2,3				0,08
L_v [dB]					65	84	80	89	95	91	77	59	47	25	17	11	7	-7	-10	-9	-16				0,12
V_{rms} [mm/s]					0,00	0,02	0,01	0,03	0,06	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				0,12

SBR-B / Hinder voor personen (v_{eff})

Begane grond	gebouwtype: Hoogbouw																								
SBR-veeqing		-15,1	-13,2	-11,2	-9,5	-7,8	-6,1	-4,7	-3,5	-2,5	-1,7	-1,2	-0,8	-0,5	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100
L_v [dB]						58	78	75	86	93	96	94	87	89	77	76	69	66	52	49	50	43			0,10
$V_{eff,max}$ [mm/s]						0,00	0,01	0,01	0,02	0,04	0,06	0,05	0,02	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000

20e verdieping																									
L_v [dB]						58	78	75	86	93	92	85	73	68	51	47	40	37	23	20	20	13			96
$V_{eff,max}$ [mm/s]						0,00	0,01	0,01	0,02	0,04	0,04	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07

40e verdieping																									
L_v [dB]						58	78	75	86	93	89	76	58	47	24	17	11	7	-7	-10	-9	-16			95
$V_{eff,max}$ [mm/s]						0,00	0,01	0,01	0,02	0,04	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06

X

Trillingsprognose railverkeer

project MARK, Utrecht
 gebouwtype Woontoren, 44 bouwlagen
 gebouwfstand (tot spoor) 60 m

bronspectrum Goederentrein 15-4-2020 23:03
 vormfactor C_v 0,65 (verhouding V_{rms}/V_{top})
 referentieafstand 20 m

passages per uur 1 (alleen $V_{eff} > 0,1$)
 peiljaar 2020
 rijsnelheid 90 km/u
 referentie snelheid 90 km/u

Bodemtrillingen

1/3-octaf	1	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200	som
bronspectrum (rms, gem)					76	88	84	86	93	93	90	87	87	81	77	82	75	71	71	72	67				99
spreadinq					3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0				
bronspectrum (rms, max)					79	91	87	89	96	96	93	90	90	84	80	85	78	74	74	75	70				102
snelheidscorrectie																									
geen																									
afstandscorrectie					-4,5	-3,7	-3,1	-2,8	-2,8	-2,8	-2,8	-2,8	-2,8	-3,3	-4,1	-5,2	-6,5	-8,2	-10,3	-13,1	-15,6				
L_v [dB]					75	87	83	86	93	93	91	87	88	81	76	80	71	66	64	62	55				99
V_{rms} [mm/s]					0,01	0,02	0,01	0,02	0,04	0,05	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				0,09
																									V_{top}
																									0,14

SBR-A / Gebouwschade

Stijf punt fundatie	gebouwtype:	User defined 3	Hoogbouw Horizontaal																						
$H_{v,1}$ [dB]					4,0	7,1	11,0	3,6	0,0	0,0	0,0	-1,0	-2,0	-3,9	-5,0	-6,6	-8,9	-12,4	-15,0	-18,0	-20,0				
L_v [dB]					78	94	94	90	93	93	91	86	86	77	71	73	62	53	49	44	35				101
V_{rms} [mm/s]					0,01	0,05	0,05	0,03	0,04	0,05	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				0,11
																									V_{top}
																									0,17

SBR-C / Verstoring van apparatuur (v_{rms})

Begane grond	vloertype:	user defined																							
$H_{v,vloer}$					0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
L_v [dB]					78	94	94	90	93	93	91	86	86	77	71	73	62	53	49	44	35				101
V_{rms} [mm/s]					0,01	0,05	0,05	0,03	0,04	0,05	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				0,11
																									V_{top}
																									0,17

20e verdieping	vloertype:	user defined																							
$H_{v,1}$ [dB]					0,0	0,0	0,0	0,0	-0,5	-1,5	-2,4	-3,4	-3,9	-3,9	-3,9	-3,9	-3,9	-3,9	-3,9	-3,9	-3,9				
$H_{v,vloer}$ [dB]					0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
L_v [dB]					78	94	94	90	92	92	88	83	82	73	67	69	58	50	45	40	31				100
V_{rms} [mm/s]					0,01	0,05	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				0,10
																									V_{top}
																									0,16

40e verdieping	vloertype:	user defined																							
$H_{v,1}$ [dB]					0,0	0,0	0,0	0,0	-0,9	-2,9	-4,8	-6,7	-7,8	-7,8	-7,8	-7,8	-7,8	-7,8	-7,8	-7,8	-7,8				
$H_{v,vloer}$ [dB]					0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
L_v [dB]					78	94	94	90	92	91	86	79	78	69	63	65	54	46	41	36	27				100
V_{rms} [mm/s]					0,01	0,05	0,05	0,03	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				0,10
																									V_{top}
																									0,15

SBR-B / Hinder voor personen (v_{eff})

Begane grond	gebouwtype:	User defined 3	Hoogbouw Horizontaal																						
SBR-veging					-15,1	-13,2	-11,2	-9,5	-7,8	-6,1	-4,7	-3,5	-2,5	-1,7	-1,2	-0,8	-0,5	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
L_v [dB]					71	88	90	86	90	92	89	85	85	77	71	73	62	53	49	44	35				98
$V_{eff,max}$ [mm/s]					0,00	0,03	0,03	0,02	0,03	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				0,008
																									V_{top}^*
																									0,000

8e verdieping																									
L_v [dB]					71	88	90	86	90	90	87	82	81	73	67	69	58	50	45	40	31				97
$V_{eff,max}$ [mm/s]					0,00	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				0,007
																									V_{top}^*
																									0,000

40e verdieping																									
L_v [dB]					71	88	90	86	89	89	85	79	77	69	63	65	54	46	41	36	27				96
$V_{eff,max}$ [mm/s]					0,00	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				0,006
																									V_{top}^*
																									0,000