

96-CON-R1468

**Achtergronden van het computerprogramma
VP-Drempel**

10 maart 1997

Ir. P.H. Waarts

Projectnaam : VP-drempel
Projectnr. : 6.21.1.8217

Pagina's : 20
Tabellen : -
Figuren : 5
Bijlagen : 2

1996

Thema : -
WP-onderwerp : 221
Trefwoord(en) : trillingen, wegverkeer

Rapport is vrij beschikbaar.

f 35.- excl.

2.80.- verz.kst

INHOUDSOPGAVE

1. INLEIDING
2. MODELLEN
3. BEOORDELING
4. VALIDATIE
5. VOORBEELD

REFERENTIES

Bijlage 1: Gegevens vrachtwagens

Bijlage 2: Resultaat VP-DREMPEL berekening (hoofdstuk 6)

1 INLEIDING

Het programma VP-DREMPEL is een van de computer programma's in de VP-serie voor het voorspellen van trillingen. VP-DREMPEL voorspelt de trillingen aan en in gebouwen nabij verkeersdrempels. De trillingsbron is vrachtverkeer rijdend over de verkeersdrempel.

Onderdelen hierin zijn:

- voertuig
- weg-onvlakheid = drempel
- wegfundering
- bodem
- gebouw of woning

In de navolgende hoofdstukken wordt op de modellen voor deze onderdelen ingegaan. Daarna zal worden ingegaan op de validatie van het programma en zullen voorbeelden worden behandeld.

2 MODELLEN

2.1 Voertuigmodel

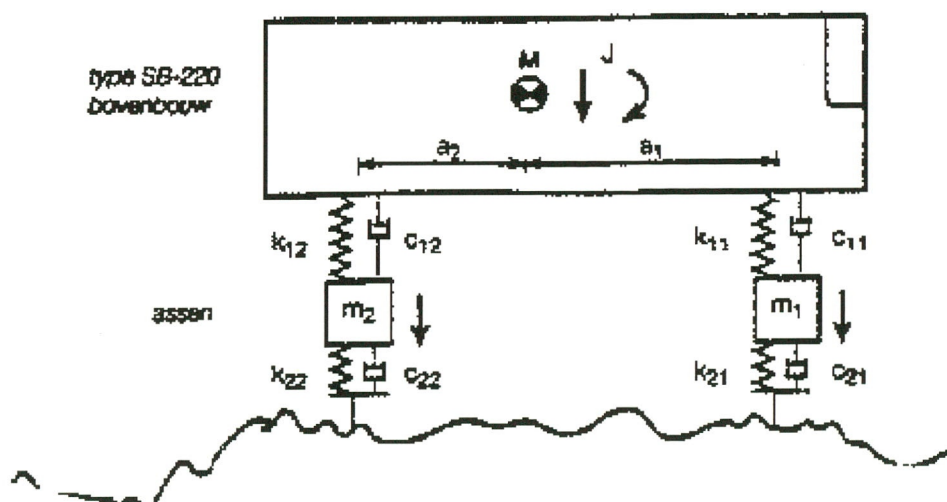
In figuur 1 is het dynamisch model van een voertuig weergegeven. Bepalend voor de dynamische belasting op het wegdek zijn:

- massa van de boven bouw van het voertuig
- massa van de assen
- positie van het massa zwaartepunt van de bovenbouw
- veer karakteristiek van de assen
- demper karakteristiek van de assen

In bijlage 1 zijn van een klein aantal (meest voorkomende) typen vrachtwagens en bussen de gegevens weergegeven. Het betreft de volgende typen:

- 2-assige vrachtwagen
- 3-assige vrachtwagen
- aanhanger
- bus type MB200 (leeg/vol)
- bus type SB200 (leeg/vol)

Figuur 1: Dynamisch voertuigmodel



2.2 Wegonvlakheid

2.2.1 Continu (niet geïmplementeerd in VP-DREMPEL, versie '96)

De onvlakheid van de weg kan beschreven worden met het variantiespectrum van de wegoneffenheid:

$$G_d(n) = G_d(n_0)(n / n_0)^{-w}$$

met:

G_d = spectrale dichtheidsfunctie voor de variantie van de hoogteïgging van het wegdek [m^3]

n = frequentie [$1/m$]

n_0 = refrentiefrequentie [$0.1 / m$]

w = (≈ 2)

Dit model komt overeen met ISO 8608. De parameters van $G_d(n_0)$ zijn afhankelijk van de staat van het wegdek:

beschrijving	$G_d(n_0)$
uitstekend	$16 \cdot 10^6$
goed	$64 \cdot 10^6$
redelijk	$256 \cdot 10^6$
slecht	$1024 \cdot 10^6$
zeer slecht	$4096 \cdot 10^6$

Het lengte profiel van de weg kan worden verkregen uit het variantiespectrum met gebruik van een random fase hoek.

$$u(x) = \sum_i^m \sqrt{2G_i n_i} \sin(n_i x + \varphi_i)$$

waarbij:

$u(x)$ = hoogteligging op afstand x

G_i = variantie spectrum

φ = random fase hoek

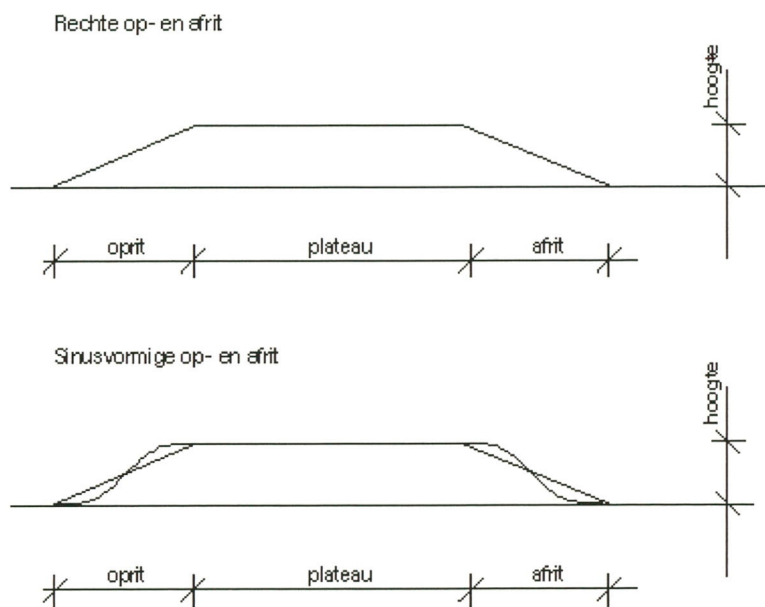
2.2.2 Discrete wegonvlakheid

Een voorbeeld van een wegonvlakheid is een verkeersdrempel of verkeersplateau. Deze discrete wegoneffenheden laten zich kenmerken door:

- de hoogte

- de opritlengte
- de lengte
- de afritlengte
- de vorm van op- en afrit: recht of sinusvormig

Figuur 2: model verkeersdrempel of plateau



2.3 Berekening van de dynamische belasting op het wegdek

De dynamische belasting op het wegdek wordt bepaald door middel van directe tijdsintegratie. Het systeem wordt geëxciteerd door een verandering van de hoogteligging van het wegdek. Op ieder tijdstip worden de krachten in het systeem berekend als gevolg van de toestandsverandering. Deze krachten leiden tot versnellingen in het systeem. Deze versnellingen kunnen door middel van twee maal integratie in de tijd worden vertaald in verplaatsingen op een volgend tijdstip. Hiermee is op een nieuw tijdstip een nieuwe systeem toestand bepaald.

Onderstaand is het numerieke model weergegeven. De numerieke integratie wordt uitgevoerd met de methode Adams-Bashfort.

$$F_i(t) = k\Delta u(t) + c\Delta v(t)$$

$$a(t) = \sum F_i / m_i$$

$$u(t) = \iint a(t)$$

waarbij:

F_i	= interne kracht	[N]
k	= veerstijfheid	[N/m]
c	= demping	[Ns/m]
m	= massa of traagheid	[kg]
u	= verplaatsing	[m]
v	= snelheid = $\int a(t)$	[m/s]
a	= versnelling	[m/s ²]

2.4 Wegfundering en bodem

Het wegdek tezamen met de wegfundering zorgt voor een belastingspreiding naar de ondergrond. Vervolgens vindt een trillingsoverdracht plaats van de wegfundering, door de bodem, naar de fundatie van een belendend gebouw.

Ten einde de belastingspreiding en de trillingsoverdracht te kunnen kwantificeren is een model voor de Eindig Elementen Methode (EEM) van de fundering plus bodem gemaakt. Het model is beschreven in [1].

Het betreft een axiaal symmetrisch model met een straal van 50 m. De dikte van de wegfundering is 0.25 m, 0.50 m of 1.00 m. De berekeningen zijn uitgevoerd met zeven bodemprofielen [3]:

- ☐ Amsterdam
- ☐ Rotterdam
- ☐ Scheveningen
- ☐ Eindhoven
- ☐ Groningen
- ☐ Maasvlakte
- ☐ Tiel/rivierengebied

De ondergrond is gemodelleerd aan de hand van de sondering en bodemprofiel (volgens [1]).

Het resultaat van de berekening is de trillingssnelheid als functie van de tijd $r(t)$ als gevolg van een eenheidspuls op het wegdek. Dit wordt berekend op een groot aantal discrete afstanden vanaf het excitatiepunt voor zowel de verticale als horizontale richting .

2.5 Berekening van de trillingssterkte op enige afstand

De response van een vrachtwagen rijdend over de verkeersdrempel op een bepaalde afstand van de drempel wordt berekend door convolutie van het krachtsignaal van de banden op het wegdek en de trillingssnelheidssignaal als gevolg van een eenheidspuls op het wegdek. Het resultaat is het tijdssignaal van de trillingssnelheid aan de oppervlakte op een bepaalde afstand van de verkeersdrempel.

De trillingssnelheid wordt als functie van de tijd als volgt berekend:

$$v(t) = r(t) * F(t) = \sum_0^t F(i - \tau) r(i) \Delta \tau$$

waarbij:

$r(t)$ = response (trillingssnelheid) op een bepaalde afstand ten gevolge van eenheidspuls op het wegdek

$F(t)$ = kracht uitgeoefend op het wegdek

De responsie wordt zowel berekend voor de horizontale als verticale richting, echter alleen als gevolg van een verticale excitatie op het wegdek

2.6 Gebouw of woning

De trillingsoverdracht van de bodem naar de fundering van het gebouw wordt berekend met behulp van enige empirische factoren, zoals gegeven in [3]. Hierbij zijn twee factoren bepalend:

1. funderingstype: funderingen op staal of op palen (en de soort paal: hout, beton, staal)
2. Stijfheid en afmetingen van het gebouw

Voor informatie over numerieke waarden wordt verwezen naar [3].

2.7 Berekening van de trillingssterkte in het gebouw

Voor de trillingsoverdracht van de fundering van het gebouw naar verticale elementen zoals muren en wanden wordt uitgegaan van empirische factoren (uit [3]). Voor de berekeningen van de trillingsoverdracht in de vloer wordt een uitgebreider rekenmodel gebruikt zoals beschreven in [4]. Hierbij wordt afhankelijk van het vloertype (materiaal) en de overspanning de eigenfrequentie en demping van de vloer bepaald. Vervolgens wordt dit vertaald naar een één-massa-veer-demper systeem met de karakteristieken van de vloer. Deze wordt aangestoten door het trillingssignaal op de fundering. Het resultaat is het trillingssignaal in het midden van de vloer.

3 BEOORDELING

In VP-DREMPEL worden de trillingen beoordeeld aan de hand van de SBR-richtlijnen-1 en -2 voor respectievelijk schade aan bouwwerken en hinder voor personen in gebouwen [5] en [6].

De maximale waarde van de trillingssnelheidssignalen op de fundering en onderdelen worden vergeleken met die in SBR-richtlijn-1. Uit het trillingssignaal in het midden van de vloer wordt de voortschrijdend effectieve waarde bepaald conform [6] en vergeleken met de streefwaarden voor trillingshinder [6]. Hierbij wordt ook rekening gehouden met het aantal voertuig passages.

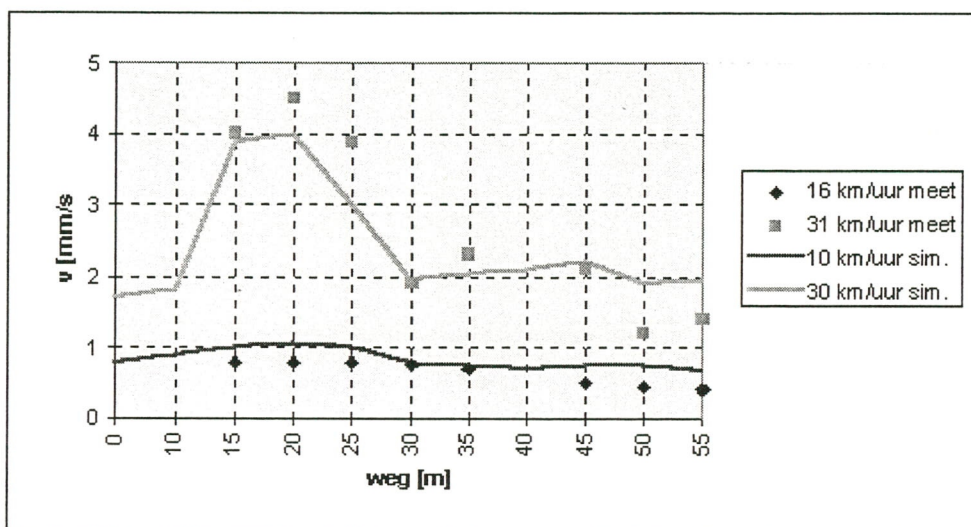
Het programma VP-DREMPEL berekent de verwachtingswaarde van de trillingen. Daarnaast wordt er een veiligheidsfactor berekend. Het voertuig, de wegfundering, bodem en woning laten zich niet exact modelleren. De spreiding in deze componenten is vertaald in een variatie-coëfficiënt. In onderstaande tabel zijn de variatie-coëfficiënten voor de verschillende modellen weergegeven. Tezamen met een gewenste kans op overschrijden van de voorspelling wordt de veiligheidsfactor berekend (voor berekening, zie [3]). Ten einde de rekenwaarde van de trillingssnelheid te krijgen wordt de verwachtingswaarde vermenigvuldigd met de veiligheidsfactor. Deze rekenwaarde wordt vergeleken met de grens- en streefwaarden in de richtlijnen.

Model	Variatie coëfficiënt
voertuig	0.0
Bodem	0.3
bodem-fundering	0.0
fundering-wanden	0.35
demping vloer	[4]

4 VALIDATIE

Een validatie is uitgevoerd waarbij met verschillende bus typen en verschillende snelheden over een wegoneffenheid is gereden. Op verschillende afstanden langs de weg is de trillingssnelheid gemeten. Daarnaast is ook een voorspelling gedaan met het numerieke model. De resultaten zijn weergegeven in onderstaande figuur 3. We zien een goede overeenkomst tussen de numerieke en meetresultaten.

Figuur 3. Resultaten van meting en simulatie bij het rijden met een SB220 bus, als functie van de afstand langs de weg.



5 VOORBEELD

In weg wordt een verkeersdrempel aangelegd. Het rijspoor ligt op 10 m afstand van een woning. Over de weg rijdt twee maal per uur een bus, type SB 220. De bussen rijden in de nacht slechts één maal per uur. De bussen rijden met een maximale snelheid van 30 km.uur.

De drempel is sinusvormig met een hoogte van 0.12 m, de lengte van de op- en afrit is 1.20 m. Onder de weg is een wegfundering van 0.25 m gebruikt. Het bodemtype ter plaatse lijkt op dat van Amsterdam.

De naast gelegen woning is op houten palen gefundeerd, gezien het raamoppervlak gedragen zij zich flexibel. In de woning bevinden zich houten vloeren met een overspanning van 3.6 m. De diepte van de woning is 8 m.

Volgens de berekening (zie figuur 4) is er hinder en schade in de woning. In bijlage 2 worden de uitgebreide resultaten gegeven.

Figuur 5 geeft hetzelfde voorbeeld bij een afstand van 25 m er is dan geen schade en/of hinder

Figuur 4: resultaat bij een afstand van 25 m tussen de woning en de drempel

Vibra Prediction - (Naamloos)

Bestand Bewerk Configuratie Debug Venster ?

Trillingsbron: **Drempel** Uitkomst: **Schade** **Hinder**

Invoer VerkeersDrempel

WEG en VOERTUIG

Voertuig: **Bus SB 200 leeg**

Snelheid: **30.00** km/h

Aantal voertuigen: **24** overdags
8 's avonds
8 's nachts

Hoogte: **0.12** m

Oprit: **1.20** m

Plateau: **0.00** m

Afrit: **1.20** m

☒ Oprit sinusvormig

☒ Afrit sinusvormig

☒ Nieuwe situatie

Bodemprofiel: **Rotterdam**

Wegfundering: **0.25** m

GEBOUW

Afstand tot drempel: **10.00** m

Fundatietype: **houten** palen

Trillingsgevoelig: ☐

Stijfheid gebouw: **laag** horizontaal
laag vertikaal

Vloeren: **hout**

Vloeroverspanning: **3.6** m

Gebouwfunctie: **wonen**

Gebouwdiepte: **8** m

Gebouwcategorie: **2 <metselwerk>**

Kort resultaat verkeersdrempel

aspect	v_rep [mm/s]	gamma	v_d [mm/s]	SBR [mm/s]
schade gebouw v_top,vert.	1.1	1.3	1.4	3.0
schade gebouw v_top,hor.	2.8	1.3	3.8	3.0
schade onderdelen v_top	3.4	1.4	4.7	9.0
hinder v_eff,max dag	0.5	1.4	0.7	0.3
hinder v_eff,max avond	0.5	1.4	0.7	0.3
hinder v_eff,max nacht	0.5	1.4	0.7	0.2

Figuur 5: resultaat bij een afstand van 25 m tussen de woning en de drempel

Vibra Prediction - (Naamloos)

Bestand Bewerk Configuratie Debug Venster ?

Trillingsbron: **Drempel** Uitkomst: **geen schade** **Hinder**

Invoer VerkeersDrempel

WEG en VOERTUIG

Voertuig: **Bus SB 200 leeg**

Snelheid: **30.00** km/h

Aantal voertuigen: **24** overdags
8 's avonds
8 's nachts

Hoogte: **0.12** m

Oprit: **1.20** m

Plateau: **0.00** m

Afrit: **1.20** m

☒ Oprit sinusvormig

☒ Afrit sinusvormig

☒ Nieuwe situatie

Bodemprofiel: **Rotterdam**

Wegfundering: **0.25** m

GEBOUW

Afstand tot drempel: **25.00** m

Fundatietype: **houten** palen

Trillingsgevoelig: ☐

Stijfheid gebouw: **laag** horizontaal
laag vertikaal

Vloeren: **hout**

Vloeroverspanning: **3.6** m

Gebouwfunctie: **wonen**

Gebouwdiepte: **8** m

Gebouwcategorie: **2 <metselwerk>**

Kort resultaat verkeersdrempel

aspect	v_rep [mm/s]	gamma	v_d [mm/s]	SBR [mm/s]
schade gebouw v_top,vert.	0.4	1.3	0.5	3.0
schade gebouw v_top,hor.	0.9	1.3	1.2	3.0
schade onderdelen v_top	1.1	1.4	1.5	9.0
hinder v_eff,max dag	0.2	1.4	0.2	0.3
hinder v_eff,max avond	0.2	1.4	0.2	0.2
hinder v_eff,max nacht	0.1	1.4	0.1	0.1
hinder v_per dag	0.0	1.4	0.1	0.1
hinder v_per avond	0.0	1.4	0.0	0.1
hinder v_per nacht				

REFERENTIES

- [1] Mechanical Vibrations - Road surface profiles ISO/DIS 8608
- [2] 'Berekening van uitbreiding van oppervlaktegolven bij dynamische belasting op wegconstructies', TNO-rapport 95-CON-R1619
- [3] Damwandconstructies, CUR rapport 162
- [4] 'Rekenmodel voor de bepaling van trillingssterkte', Publicatie nr. 9/1995 MVROM
- [5] SBR-richtlijn-1, 'Schade aan bouwwerken door trillingen, SBR, 1993
- [6] SBR-richtlijn-2, Hinder voor personen in gebouwen door trillingen, SBR, 1993

Bijlage 1: Gegevens vrachtwagens

Dimensies:

Bovenbouw:

Length	[m]
Mass	[kg]
Inertia	[kg m ²]

Assen:

Asym	[m]
TireMass	[kg]
Ax.Spring	[N/m]
AxDempingIn	[Ns/m]
AxDempingOut	[Ns/m]
TireSpring	[N/m]
TireDempingIn	[Ns/m]
TireDempingOut	[Ns/m]

2-assig voertuig

Length	7.0
Mass	18500.
Inertia	160000.

axle	1	2
Asym	4.5	-2.5
TireMass	750.	1500.
AxSpring	240000.	400000.
AxDempingIn	5000.	15000.
AxDempingOut	5000.	15000.
TireSpring	1000000.	2000000.
TireDempingIn	1000.	20000.
TireDempingOut	1000.	20000.

3-assig voertuig

Length 7.
 Mass 20000.
 Inertia 60000.

Axle	1	2	3
Asym	4.5	-1.5	-2.5
TireMass	750.	1500.	1500.
AxSpring	200000.	500000.	500000.
AxDampingIn	10000.	30000.	30000.
AxDampingOut	10000.	30000.	30000.
TireSpring	1000000.	2000000.	2000000.
TireDampingIn	10000.	20000.	20000.
TireDampingOut	10000.	20000.	20000.

Aanhanger

Length 5.
 Mass 20000.
 Inertia 50000.

axle	1	2	3
Asym	2.5	-2.5	-2.5
TireMass	800.	800.	1500.
AxSpring	1600000.	1600000.	500000.
AxDampingIn	800.	800.	30000.
AxDampingOut	800.	800.	30000.
TireSpring	890000.	890000.	2000000.
TireDampingIn	18868.	18868.	20000.
TireDampingOut	18868.	18868.	20000.

96-CON-R1468

10 maart 1997

17

Bus MB 200 leeg

Length	5.63
Mass	10200.
Inertia	30600.

Axle	1	2
dAsym	3.15	-2.48
dTireMass	730.	1230.
AxSpring	210000.	225000.
AxDempingIn	3750.	6250.
AxDempingOut	16670.	35900.
TireSpring	880000.	2160000.
TireDempingIn	500.	1031.
TireDempingOut	500.	1031.

Bus MB 200 vol

Length	5.63
Mass	16500.
Inertia	49500.

Axle	1	2
dAsym	3.15	-2.48
dTireMass	730.	1230.
AxSpring	210000.	225000.
AxDempingIn	3750.	6250.
AxDempingOut	16670.	35900.
TireSpring	880000.	2160000.
TireDempingIn	500.	1031.
TireDempingOut	500.	1031.

Bus SB 200 leeg

Length	5.63
Mass	11172.
Inertia	33410.

Axle	1	2
Asym	3.15	-2.48
TireMass	730.	1230.
AxSpring	93000.	85000.
AxDampingIn	2300.	2000.
AxDampingOut	33000.	10000.
TireSpring	880000.	2160000.
TireDampingIn	507.	1031.
TireDampingOut	507.	1031.

Bus SB 200 vol

Length	5.63
Mass	17000.
Inertia	51000.

Axle	1	2
Asym	3.15	-2.48
TireMass	730.	1230.
AxSpring	93000.	85000.
AxDampingIn	2300.	2000.
AxDampingOut	33000.	10000.
TireSpring	880000.	2160000.
TireDampingIn	507.	1031.
TireDampingOut	507.	1031.

Bijlage 2: Resultaat VP-DREMPEL berekening (hoofdstuk 6)

Programma : VP-Drempel
Licentiehouder : wspb

Versie:1.02.A 1996
dd: 15/11/1996

Invoergegevens**Drempel**

- hoogte	0.120 m	
- oprit lengte	1.200 m	sinusvormig
- plateau lengte	0.000 m	
- afrit lengte	1.200 m	sinusvormig

Voertuig : Bus SB 200 leeg
rijdsnelheid 30 km/uur

Bodemprofiel:	Rotterdam
Afstand hart rijspoor tot gebouw	10 m
Gebouw	- diepte 8 m
	- fundatie houten palen
	- stijfheid gebouw horizontaal laag
	verticaal laag
	- vloeren hout

Normering volgens de SBR-Richtlijn 1 schade

- gebouwfunctie	wonen
- gebouwcategorie	2 (metselwerk)

Beoordeling volgens SBR-Richtlijn 2 hinder

- aantal voertuigen in dag periode	24
- aantal voertuigen in avond periode	8
- aantal voertuigen in nacht periode	8

Nieuwe situatie.

Programma : VP-Drempel
 Licentiehouder : wspb

Versie:1.02.A 1996
 dd: 15/11/1996

Voorspelling van trillingen

Berekend zijn de verwachte topwaarde en voortschrijdende effectieve waarde van de trillingssnelheid met een overschrijdingskans van 10 %
 De dominante frequentie van de trilling op de fundering is: 5 Hz.

Trillingsschade

aspect	v_rep (mm/s)	gamma	v_d (mm/s)	max volgens SBR-1
-----	-----	-----	-----	-----
gebouw v_top verticaal	1.1	1.3	1.4	3.0
gebouw v_top horizontaal	2.8	1.3	3.8	3.0
onderdelen v_top	3.4	1.4	4.7	9.0
-----	-----	-----	-----	-----

Trillingshinder

aspect	v_rep (mm/s)	gamma	v_d (mm/s)	max volgens SBR-2
-----	-----	-----	-----	-----
vloer v_eff,max dag	0.50	1.4	0.70	0.30
vloer v_eff,max avond	0.50	1.4	0.70	0.30
vloer v_eff,max nacht	0.50	1.4	0.70	0.15
-----	-----	-----	-----	-----

Conclusie

Uit de berekening blijkt dat er schade aan het gebouw optreedt.
 Dit door overschrijding van de grenswaarden voor:
 - fundatie horizontaal

Uit de berekening blijkt dat er hinder bestaat.
 De streefwaarde voor v_eff dag/avond/nacht wordt overschreden.

Verklaring gehanteerde symbolen:

v_eff,max is de voortschrijdend effectieve waarde van de trillingsgrootheid
 v_per is de effectieve waarde van v_eff,max
 bepaald per beoordelingsperiode
 v_rep is de representatieve waarde van de trillingsgrootheid
 gamma is de veiligheidscoëfficiënt
 v_d is de rekenwaarde van de trillingsgrootheid
 (v_d = gamma * v_rep)