

Memo

Aan: Ministerie van Infrastructuur en Milieu
Van: Koopman, A.
Kopie:

Datum: 26 februari 2014

Project: Reparatie BTS
Kenmerk: LA.131001a.M04

Doelstelling

Voorstel voor bepaling V_{max} , als bijlage bij de BTS: $V_{max,BTS}$.
Het gaat hier om een bepalingsmethode, welke bestaat uit een meetmethode en een naverwerkingsmethode.

De meetmethode beschrijft hoe bij treinverkeer per pand van elke gebeurtenis een trillingsniveau ($V_{eff,max}$) wordt gemeten en hoe lang moet worden gemeten.
De meetmethode schrijft NIET voor hoe panden worden geselecteerd, e.d.
De naverwerkingsmethode beschrijft hoe uit de vergaarde data ($V_{eff,max}$) de beoordelingsgrootte $V_{max,BTS}$ alsmede de reproduceerbaarheid (R) van $V_{max,BTS}$ moet worden bepaald en hoe de toetswaarden worden bepaald.

Uitgangspunten

- Beoordeeld wordt het maximale niveau in een week, conform de grootte V_{max} van de SBR ($V_{max,stat}$).
- De meetmethode en de naverwerkingsmethode is gebaseerd op die van de SBR maar verder uitgebreid en verfijnd met het doel de reproduceerbaarheid te vergroten.
- Er worden geen treinpassages als "outliers" weggegooid.
- Wel zal het regelmatig voorkomen dat een gemeten gebeurtenis hoger uitvalt dan de $V_{max,BTS}$. N.B.: dit was ook al het geval bij de $V_{max,stat}$.
- Om zeker te stellen dat ook van de enkele procenten sterke gebeurtenissen (vaak door goederentreinen) voldoende wordt gemeten dient, conform de SBR, ten minste een week te worden gemeten.
- De bepalingsmethode geeft aan wat de reproduceerbaarheid van de meting is, uitgedrukt als onzekerheidspercentage in het resultaat. Een binnen enkele maanden uitgevoerde tweede meting onder verder gelijkblijvende omstandigheden zal met een kans van 95% een resultaat opleveren dat minder dan het onzekerheidspercentage afwijkt van de eerste meting.
- Gestreefd wordt naar een onzekerheid van 10%. Bij de belangrijke grenswaarde 0,4 is de onzekerheid dan in de orde van de afrondingsfout. Voor het, door middel van een voor-en nameting, toetsen of er sprake is van een toename van meer dan 30% is het ook van belang dat de onzekerheid in elk van die metingen niet te groot is.

- Als de onzekerheid na een week meten nog steeds groter is dan 10% kan er voor worden gekozen de meetduur te verlengen, waardoor de onzekerheid kleiner wordt (en het resultaat nog wat zal veranderen).
- Wanneer de onzekerheid groter is dan 10% maar de meting niet wordt voortgezet wordt de onzekerheid verrekend in de toetswaarden.

Begrippen

Grootheid	Eenheid	betekenis
V _{max}	[-]	Hoogste gemeten waarde conform SBR B
V _{max,stat}	[-]	Hoogste waarde, bepaald conform de statistische methode van de SBR B
V _{max,BTS}	[-]	Hoogste waarde, bepaald conform de hier beschreven naverwerkingsmethode
V _{eff,max}	[-]	Hoogste waarde van een gebeurtenis, over alle meetrichtingen van een meetpunt, conform SBR B
V _{eff,max,j}	[-]	Hoogste waarde van een gebeurtenis, van een meetrichting j van een meetpunt, conform SBR B
V _{eff,max,j,band}	[-]	Hoogste waarde van een gebeurtenis, van een meetrichting j van een meetpunt, per octaafband
V _{eff,max,band}	[-]	Hoogste waarde van een gebeurtenis, over alle meetrichtingen van een meetpunt, per octaafband
Q	[-]	Verhouding van het trillingsniveau bij de nameting ten opzichte van dat bij de voormeting ("de toename")
F _{dom}	[Hz]	Dominante frequentie van een meetpunt, zijnde de dominante frequentie van de dominante richting, conform SBR A
H _{gebouw,band}	[-]	Overdrachtsfactor tussen fundering en vloerpunten, per band
top50%		De verzameling met de 50% hoogste waarden van een verzameling
#top50%	[-]	Aantal waarden in de top50%
#topX%	[-]	Aantal waarden in de top X%
#meetdagen	[-]	Totaal aantal dagen dat op het funderingspunt gemeten is
μ	[-]	Gemiddelde van log(V _{eff,max})
σ	[-]	Standaard deviatie van log(V _{eff,max})
β	[-]	Betrouwbaarheidscoëfficiënt
R	[%]	De reproduceerbaarheid, uitgedrukt als de onzekerheid in V _{max,BTS}
t ⁻¹		De inverse van Student's cumulatieve verdelingsfunctie

Meetmethode

- De metingen worden verricht conform SBR B.
- In uitbreiding op de SBR B wordt de volgende aanpak gehanteerd.
- Naast de gekozen meetpunten conform SBR B kan ook een triaxiaal meetpunt op de fundering van het pand worden aangebracht, conform de "indicatieve methode" van SBR A. Dit meetpunt kan worden gebruikt als referentiepunt voor de toekomst en als controlepunt ter identificatie van stoortrillingen. Dit meetpunt kan ook worden gebruikt als fundatiepunt tijdens de meting (zie optie 2 hieronder).
- Een van de twee volgende opties wordt gekozen:
- Optie 1: lang meten op de vloer
 - o Gedurende ten minste 7x24 uur wordt op alle meetpunten gemeten.
 - o Van alle gebeurtenissen met een $V_{eff,max} > 0,1$ worden de $V_{eff,max,j}$ en $V_{eff,max}$ vastgelegd.
 - o Niet spoorgerelateerde gebeurtenissen, zoals lopen in woningen en wegverkeer, worden uit de dataset verwijderd.
 - o Verwijderde gebeurtenissen met een $V_{eff,max}$ van 25% of meer van V_{max} van deze 7x24 uur worden apart vastgelegd en gerapporteerd, met aanduiding van mogelijke bron.
- Optie 2: lang meten op de fundering
 - o Er wordt een triaxiaal meetpunt op de fundering van het pand worden aangebracht, conform de "indicatieve methode" van SBR A.
 - o Gedurende 24 uur wordt op alle meetpunten gemeten.
 - o Van alle gebeurtenissen met een $V_{eff,max} > 0,1$ worden de $V_{eff,max,j}$ en de bijbehorende tijdsignalen vastgelegd.
 - o Niet spoorgerelateerde gebeurtenissen, zoals lopen in woningen en wegverkeer, worden uit de dataset verwijderd.
 - o Verwijderde gebeurtenissen met een $V_{eff,max}$ van 25% of meer van V_{max} van deze 24 uur worden apart vastgelegd en gerapporteerd, met aanduiding van mogelijke bron.
 - o Van de resterende gebeurtenissen worden de hoogste 50% geselecteerd, waarvan de signalen door een octaafbank worden gehaald met middenfrequenties 2 t/m 63 Hz, waarna daarna de $V_{eff,max,j,band}$ worden bepaald.
 - o Per octaafband wordt van elk meetpunt dat meer dan één meetrichting heeft de dominante richting bepaald als die welke geldt voor de meeste top50%-gebeurtenissen.
 - o Per gebeurtenis en per octaaf wordt de verhouding bepaald tussen enerzijds $V_{eff,max,j}$ voor de dominante richting van een vloerpunt (of $V_{eff,max}$ van een uniaxiaal meetpunt) bij die octaafband en anderzijds $V_{eff,max,j}$ voor de dominante richting van het fundatiepunt bij die octaafband. Per vloerpunt wordt het gemiddelde over de gebeurtenissen bepaald en vastgelegd als overdrachtsfactoren $H_{gebouw,band}$.
 - o Gedurende ten minste 7x24 uur wordt aan het funderingspunt gemeten.
 - o Van alle gebeurtenissen met een $V_{eff,max} > 0,02$ worden de $V_{eff,max,j}$, de $V_{eff,max}$ en de dominante frequentie f_{dom} vastgelegd.

- o Niet spoorgerelateerde gebeurtenissen, zoals wegverkeer, worden uit de dataset verwijderd.
- o Per gebeurtenis wordt $V_{eff,max}$ van een vloerpunt bepaald door $V_{eff,max}$ van de fundering te vermenigvuldigen met $H_{gebouw,band}$ waarbij die octaafband wordt gekozen waarin f_{dom} valt.
- o De gebruikte overdrachtsfactoren, met frequentie van voorkomen in de gebeurtenissen, worden gerapporteerd.
- Conform de naverwerkingsmethode van deze bepalingmethode wordt de reproduceerbaarheid R van elk van de meetpunten bepaald. In geval optie 1 is gehanteerd wordt R ook per meetrichting bepaald.
- Indien $R \leq 10\%$ dan is er voldoende gemeten. Indien $R > 10\%$ dan wordt besloten of de meting wordt verlengd of dat toetswaarden worden verzwaard conform de naverwerkingsmethode van deze bepalingmethode. Aangezien R per meetpunt of meetrichting wordt bepaald en de naverwerkingsmethode tevens de te toetsen $V_{max,BTS}$ oplevert per meetpunt of -richting ligt het in de rede verlening alleen te overwegen indien meetpunten of -richtingen met een hoge $V_{max,BTS}$ een $R > 10\%$ hebben.

Naverwerkingsmethode

De dataset bestaat uit waarden voor $V_{eff,max,j}$ (dus per meetpunt en per richting een waarde) voor een reeks aan gebeurtenissen. Bij keuze voor optie 2 is voor de meetpunten anders dan het referentiepunt op een fundatie geen waarde per richting beschikbaar maar een waarde voor het meetpunt. Dit is tevens het geval bij uniaxiale meetpunten bij optie 1. In de volgende stappen moet voor dergelijke meetpunten $V_{eff,max,j}$ gelezen worden als $V_{eff,max}$.

- Er wordt vastgesteld op grond van hoeveel meetdagen de verzameling $V_{eff,max,j}$ waarden tot stand is gekomen: #meetdagen
 - De gebeurtenissen met een $V_{eff,max} > 0,02$ op het funderingspunt worden geselecteerd. Indien er niet voor gekozen is een funderingspunt te hanteren wordt de selectie bepaald op grond van een meetpunt op de laagst beschikbare verdieping met als criterium $V_{eff,max} > 0,05$.
 - Een willekeurig minder streng criterium (hoger dan 0,02 c.q. 0,05) is toegestaan maar kan leiden tot een langere benodigde meetduur.
- BEGIN
- Per meetpunt wordt een top50% bepaald.
 - De grootte van de top50% wordt vastgesteld: #top50%.
 - Van de top50% wordt de natuurlijke logaritme genomen: $\log(V_{eff,max,j})$.
 - Van de $\log(V_{eff,max,j})$ worden het gemiddelde μ en de standaard deviatie σ bepaald:

$$\mu = \text{gemiddelde } \{ \log(V_{eff,max,j}) \}$$
$$\sigma = \text{standaardafwijking } \{ \log(V_{eff,max,j}) \}$$

- De betrouwbaarheidscoëfficiënt β wordt vastgesteld volgens de formule:

$$\beta = t^{-1} [1 - (\#meetdagen/7)/\#top50 ; \#top50\% - 1]$$

- Hieruit wordt $V_{max,BTS}$ per meetpunt en, indien van toepassing, per meetrichting bepaald volgens de formule:

$$V_{max,BTS} = \exp(\mu + \beta \sigma);$$

EIND

- Getoetst wordt of een iteratie slag nodig is: herhaling van de procedure met een kleinere selectie van meetwaardes, hetgeen gebeurt volgens de formule:

Iteratie indien

$$(\#\{V_{eff,max,j} > V_{max,BTS}\} > \#meetdagen/7) \ \& \ (\#top50\% > 15 \cdot \#meetdagen/7)$$

waarbij $\#\{V_{eff,max,j} > V_{max,BTS}\}$ het aantal gebeurtenissen is waarvan $V_{eff,max,j}$ groter is dan $V_{max,BTS}$ van dat meetpunt en die meetrichting.

- De iteratie wordt uitgevoerd door het hele proces tussen BEGIN en EIND te herhalen waarbij de huidige top50 de basis vormt om een nieuwe top50 te bepalen.
- De iteratieslagen worden herhaald totdat niet langer aan het iteratiecriterium wordt voldaan (top25%, top12,5% etc.).
- Van de laatste iteratieslag worden de resultaten vastgelegd: $V_{max,BTS}$, μ , σ , β en $\#top50\%$, welke nu $\#topX\%$ wordt genoemd.
- Per iteratieslag wordt getoetst of $\#\{V_{eff,max} > V_{max,BTS}\}$ niet weer toeneemt, in welk geval de iteratie stop wordt gezet en de resultaten van de voorlaatste iteratie wordt gebruikt.
- Reproduceerbaarheid R wordt per meetpunt en, indien van toepassing, per meetrichting bepaald volgens de formule

$$R = 100\% \cdot \sqrt{2(1+\beta^2)\sigma^2 / \#topX\%}$$

- De toetswaarde voor $V_{max,BTS}$ bedraagt:

$$\begin{array}{ll} V_{max,BTS} & \text{indien } R \leq 10\% \\ (1+R/100\%) \cdot V_{max,BTS} & \text{indien } R > 10\% \end{array}$$

- De toename van $V_{max,BTS}$ is een verhouding tussen de meetwaarde van een nameting ten opzichte van die van een voormeting. Voor die toename hanteert de BTS een criterium van 1,3. De verhouding wordt in deze bepalingmethode aangeduid met Q. Indien Q kleiner is dan 1 dan is er sprake van een afname. Q wordt bepaald aan de hand van de volgende formule:

$$Q = V_{max,BTS_{na}} / V_{max,BTS_{voor}}$$

$V_{max,BTS_{voor}}$ en $V_{max,BTS_{na}}$ zijn hierbij de uit respectievelijk de voor- en de nameting bepaalde $V_{max,BTS}$ -en (dus *zonder* de voor de toetswaarde te gebruiken correctiefactor $(1+R/100\%)$).

- Voor de toetsing van Q dient de onzekerheid R_Q over die toename te worden bepaald volgens de formule:

$$R_Q = \sqrt{(R_{\text{voor}}^2 + R_{\text{na}}^2)}$$

- De toetswaarde voor Q bedraagt:

Q	indien $R_Q \leq 14\%$
$(1 + R_Q / 100\%) \cdot Q$	indien $R_Q > 14\%$

Toetsing geschiedt met de nauwkeurigheid waarmee de criteria zijn geformuleerd, maar daarbij dienen fouten door dubbele afronding te worden voorkomen.

- Tussenresultaten (meetwaardes, percentages, etc.) worden afgerond en opgeslagen met tenminste 3 significante cijfers.
- Bij toetsing wordt een toetswaarde eerst afgerond naar de meest significante decimaal van het toetsingscriterium.

Toelichting

De Beleidsregel Trillinghinder Spoor (BTS) definieert in artikel 1 de beoordelingsgrootheid V_{max} . In de bijlage bij artikel 1 wordt beschreven hoe in een situatie de waarde van deze grootheid dient te worden bepaald. Daarbij worden gedeeltes van de SBR Richtlijn B van toepassing verklaard. Voor het bepalen van V_{max} wordt verwezen naar onderhavige memo. De bepalingmethode in deze memo wijkt op een aantal punten af van SBR Richtlijn B. Het resultaat van de bepalingmethode wordt om die reden, voor de duidelijkheid, als $V_{\text{max},\text{BTS}}$ aangeduid. Belangrijke afwijkingen t.o.v. de SBR zijn de volgende.

- Er wordt de mogelijkheid geboden om een groot deel van de meting te laten uitvoeren op een "funderingspunt" (bijvoorbeeld buiten aan de gevel), in plaats van midden op vloeren in woonkamers en slaapkamers. Er wordt beschreven hoe de meetprocedere en de naverwerking dan moet plaatsvinden. Dit is toegevoegd om een langere meetduur te faciliteren. De aanpak is eerder toegepast in o.a. het trillingsonderzoek ten behoeve van het Tracébesluit voor Sporen in Den Bosch.
- De reproduceerbaarheid "R" dient te worden bepaald. Dit is de bandbreedte (als percentage van $V_{\text{max},\text{BTS}}$) waarin een nieuwe meting, binnen enkele maanden uitgevoerd onder verder gelijkblijvende omstandigheden, met grote waarschijnlijkheid zal vallen. Deze kwantificering is met name van nut bij latere beoordelingen wanneer moet worden vastgesteld in welke mate er sprake is van een toename.
- De SBR richtlijn biedt een procedure om de toetsingswaarde statistisch te bepalen, welke in de praktijk ook veel wordt gebruikt. Deze statistische methode is in de nieuwe bepalingmethode verder uitgewerkt. De methode bepaalt, conform de SBR, de "hoogste waarde in een week" en levert bovendien een kwantificering van de reproduceerbaarheid.

- De toetsingswaarde wordt niet per dagdeel vastgesteld, en wel om de volgende redenen. Ten eerste is het zo dat treinen zeer zelden kunnen worden vastgepind op een dagdeel: een maatgevende, sterke trillingen veroorzakende trein die tijdens de meting overdag passeert kan een dag, een maand of een jaar later 's nachts (of, voor reizigerstreinen: in de randen van de nacht) passeren. Ten tweede is voor een aparte toetsingswaarde in de nacht een zeer langdurige meting nodig, gesteld een gewenste reproduceerbaarheid van 10%. Het niet bepalen, maar wel beoordelen, per dagdeel was bij toepassing van de SBR bij railinfraprojecten overigens ook al vrij gebruikelijk. Overigens sluit de aangepaste BTS een aparte bepaling per dagdeel niet geheel uit. Als kan worden aangetoond dat bepaalde specifieke, maatgevende, treinen nu en in de toekomst nooit in de nacht, het maatgevende dagdeel, zullen rijden kan er alsnog voor worden gekozen om een aparte toetsingwaarde voor de nacht te bepalen met uitsluiting van deze treinen. Daarvoor hoeven slechts deze treinen uit de dataset te worden gehaald, waarna wederom de statistische verwerking wordt gedaan en reproduceerbaarheid wordt gecontroleerd (en de meetduur misschien nog wordt verlengd).