



# Ontwerp van voetgangersbruggen Richtlijn





**Inhoudsopgave**

|       |                                                                                                                                 |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Inleiding .....                                                                                                                 | 4  |
| 2     | Definities .....                                                                                                                | 4  |
| 3     | Ontwerp procedure .....                                                                                                         | 6  |
| 4     | Ontwerpstappen .....                                                                                                            | 9  |
| 4.1   | Stap 1: Evaluatie van natuurlijke frequenties .....                                                                             | 9  |
| 4.2   | Stap 2: Controle kritische bereik van natuurlijke frequenties .....                                                             | 9  |
| 4.3   | Stap 3: Beoordeling van ontwerpsituaties .....                                                                                  | 9  |
| 4.3.1 | Stap 3a: Beoordeling van verkeersklassen .....                                                                                  | 12 |
| 4.3.2 | Stap 3b: Beoordeling van comfort klassen .....                                                                                  | 13 |
| 4.4   | Stap 4: Beoordeling van damping parameters .....                                                                                | 14 |
| 4.4.1 | Damping model .....                                                                                                             | 14 |
| 4.4.2 | Dampingverhoudingen voor gebruiksbelastingen .....                                                                              | 16 |
| 4.4.3 | Dampingverhoudingen bij grote trillingsamplitudes .....                                                                         | 16 |
| 4.5   | Stap 5: Beoordeling van de maximum versnelling .....                                                                            | 17 |
| 4.5.1 | Harmonische belastingsmodellen .....                                                                                            | 17 |
| 4.5.2 | Responsie Spectrum Methode voor voetgangersstromen .....                                                                        | 21 |
| 4.6   | Stap 6: Controle van criteria voor "lateral lock-in" .....                                                                      | 23 |
| 4.7   | Step 7: Control van comfort niveau .....                                                                                        | 23 |
| 5     | Berekening van de dynamische eigenschappen van voetgangersbruggen ...                                                           | 24 |
| 5.1   | Inleiding .....                                                                                                                 | 24 |
| 5.2   | Responsiemetingen .....                                                                                                         | 24 |
| 5.2.1 | Metingen van de responsie op omgevingsbelasting ten behoeve van<br>identificatie van de kritische natuurlijke frequenties ..... | 25 |
| 5.2.2 | Ruwe meting van dampingverhouding voor kritische natuurlijke<br>frequenties .....                                               | 25 |
| 5.2.3 | Meting van de responsie door een enkele voetganger .....                                                                        | 25 |
| 5.2.4 | Meting van de responsie door een groep voetgangers .....                                                                        | 26 |
| 5.2.5 | Meting van de responsie door een continu stroom van voetgangers ..                                                              | 26 |
| 5.3   | Parameter identificatie .....                                                                                                   | 26 |
| 5.3.1 | Metingen aan de hand van gedwongen trillingen .....                                                                             | 26 |
| 5.3.2 | Metingen aan de hand van door omgevingsbelasting veroorzaakte<br>trillingen .....                                               | 27 |
| 5.3.3 | Metingen aan de hand van vrije trilling .....                                                                                   | 27 |
| 5.4   | Instrumentatie .....                                                                                                            | 27 |
| 5.4.1 | Responsie meetinstrumenten .....                                                                                                | 27 |

|       |                                                                |    |
|-------|----------------------------------------------------------------|----|
| 5.4.2 | Meetinstrumenten ten behoeve van parameter identificatie ..... | 27 |
| 6     | Beperking van de dynamische responsie .....                    | 29 |
| 6.1   | Inleiding .....                                                | 29 |
| 6.2   | Aanpassing van de massa.....                                   | 29 |
| 6.3   | Aanpassing van de eigenfrequentie .....                        | 29 |
| 6.4   | Aanpassing van damping .....                                   | 29 |
| 6.4.1 | Inleiding .....                                                | 29 |
| 6.4.2 | Eenvoudige maatregelen .....                                   | 29 |
| 6.4.3 | Additionele dampingapparaten .....                             | 30 |
| 7     | Referenties .....                                              | 34 |

**Tabel met veel voorkomende symbolen**

|                          |                                                                                                     |                      |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| $a_{\text{limit}}$       | limiet versnelling voor een gegeven comfortklasse                                                   | [m/s <sup>2</sup> ]  |
| $a_{\text{max}}$         | berekende waarde van de maximum versnelling voor een gespecificeerde ontwerpsituatie                | [m/s <sup>2</sup> ]  |
| $B$                      | breedte                                                                                             | [m]                  |
| $d$                      | voetgangersdichtheid op een oppervlakte                                                             | [P/m <sup>2</sup> ]  |
| $f, f_i$                 | natuurlijke frequentie onder beschouwing                                                            | [Hz]                 |
| $f_s$                    | stap frequentie van een voetganger                                                                  | [Hz]                 |
| $P$                      | krachtamplitude van een enkele voetganger                                                           | [N]                  |
| $P \times \cos(2\pi ft)$ | harmonische belasting van een enkele voetganger                                                     | [N]                  |
| $L$                      | lengte                                                                                              | [m]                  |
| $m^*$                    | modale massa                                                                                        | [kg]                 |
| $M$                      | massa                                                                                               | [kg]                 |
| $n$                      | aantal voetgangers op belaste oppervlakte $S$<br>( $n = S \times \text{voetgangersdichtheid}$ )     | [P]                  |
| $n'$                     | equivalent aantal voetgangers op belaste oppervlakte $S$                                            | [P/m <sup>2</sup> ]  |
| $p(t)$                   | verdeelde oppervlaktebelasting                                                                      | [kN/m <sup>2</sup> ] |
| $S$                      | belast oppervlak                                                                                    | [m <sup>2</sup> ]    |
| $\delta$                 | logaritmisch decrement van de demping                                                               | [-]                  |
| $\mu$                    | verdeelde massa per eenheid van lengte                                                              | [kg/m]               |
| $\Phi(x)$                | trillingsvorm (trilvorm, mode shape)                                                                | [-]                  |
| $\psi$                   | reductie coëfficiënt voor de kans dat de stapfrequentie de beschouwde natuurlijke frequentie nadert | [-]                  |
| $\xi$                    | dampingverhouding                                                                                   | [-]                  |

# 1 Inleiding

Trillingen vormen een steeds belangrijker probleem bij het ontwerp van voetgangersbruggen. Complexe bruggen (zoals tuibruggen en of kettingbruggen) met steeds grotere overspanningen en efficiëntere bouwmaterialen resulteren in lichtgewicht constructies en grotere verhoudingen tussen belasting en eigengewicht. Als resultaat van deze tendens, zijn voetgangersbruggen gevoeliger voor trillingen geworden. De meest voorkomend dynamische belastingen op voetgangersbruggen, naast windbelasting, zijn de door mensen veroorzaakte voetstapbelastingen tijdens het lopen of het joggen.

De grondbeginselen van deze richtlijn en het begeleidende achtergrond document zijn voorbereid door:

- Christiane Butz en Christoph Heinemeyer van RWTH Aachen University, Duitsland,
- Andreas Keil, Mike Schlaich, Arndt Goldack en Stefan Trometer van Schlaich Bergermann und Partner, Duitsland,
- Mladen Lukić, Bruno Chabrolin, Arnaud Lemaire en Pierre-Olivier Martin, van Centre Technique Industriel de la Construction Métallique, Frankrijk,
- Álvaro Cunha en Elsa Caetano van Faculdade de Engenharia do Universidade do Porto, Portugal.

Deze richtlijn is gebaseerd op de resultaten die binnen onderzoekproject RFS-CR-03019 "Advanced Load Models for Synchronous Pedestrian Excitation and Optimised Design Guidelines for Steel Footbridges (SYNPEX)" zijn bepaald met financiële ondersteuning door de "Research Fund for Coal and Steel" (RFCS).

Meer informatie met betrekking tot deze richtlijnen, kan in het begeleidende achtergrond document [1] worden gevonden.

# 2 Definities

De volgende definities zijn gerelateerd aan het gebruik van deze richtlijn.

|         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Demper  | Apparaat in een constructie bedoelt om de omvang van trilling te verminderen door middel van dissipatie van energie.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Demping | <p>Demping is een effect, inherent aan een systeem of specifiek toegevoegd voor dat doel, dat leidt tot een vermindering van de trilling van een oscillerend systeem in de tijd. Demping is energiedissipatie van een trillend systeem met tijd of afstand. Voor constructies bestaat de totale demping uit</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Materiaal en structurele demping</li><li>• Demping door meubilair en afbouw</li><li>• Geometrische demping</li></ul> |

|                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dynamische actie                            | Actie die significante versnellingen van de constructie of de constructieve onderdelen kunnen veroorzaken.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Modale massa =<br>gegeneraliseerde<br>massa | <p>Een systeem met meerdere vrijheidsgraden kan tot een combinatie van meerdere enkelvrijheidsgraad (SDOF) systemen worden gereduceerd met overeenkomende eigenfrequenties.</p> $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k^*}{m^*}}$ <p>waarin <math>f</math> is de natuurlijke frequentie,<br/>uitgedrukt in Hz</p> <p><math>k^*</math> is de modale stijfheid</p> <p><math>m^*</math> is de modale massa.</p> <p>De modale massa kan worden gezien als de geactiveerde massa in een bepaalde trilvorm.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Natuurlijke frequentie                      | <p>De natuurlijke frequentie is de frequentie van vrije trilling van een systeem. Voor een systeem met meerdere vrijheidsgraden, zijn de natuurlijke frequenties de frequenties van de trilvormen. Het aantal natuurlijke frequenties en bijbehorende trilvormen is afhankelijk van het aantal graden van vrijheid. Zij worden over het algemeen gesorteerd op de hoeveelheid energie die door de trilling vrijkomt; de eerste natuurlijke frequentie heeft het laagste energieniveau en heeft de grootste kans te worden geactiveerd.</p> <p>De vergelijking voor de natuurlijke frequentie voor één enkele vrijheidsgraad (SDOF) systeem is:</p> $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$ <p>waarin <math>K</math> is de stijfheid</p> <p><math>M</math> is de massa.</p> <p>De afleiding van natuurlijke frequenties wordt beschreven in hoofdstuk 4.1.</p> <p>De frequentie <math>F</math> is gelijk aan één gedeeld door de trillingstijd <math>T</math> (<math>f = 1 / T</math>).</p> |
| Resonantie                                  | Een systeem is in resonantie als bij een kleine verandering van de frequentie van een gedwongen trilling de responsie daalt. Als de damping relatief klein is dan is de resonantie frequentie gelijk aan de natuurlijke frequentie.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

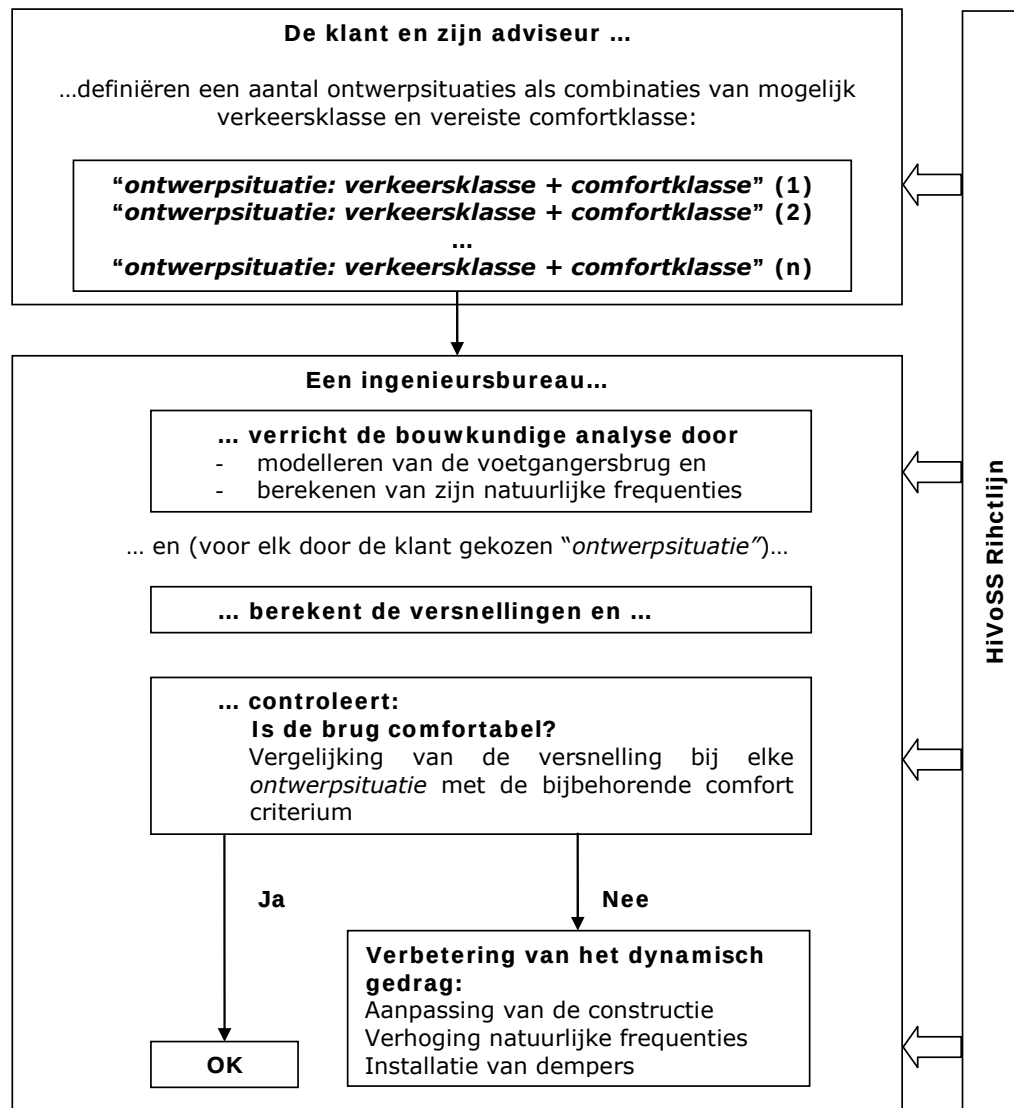
|                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Responsie spectrum | Een responsie spectrum is een grafiek van de piek van de steady state respons (meestal de maximale verplaatsing, snelheid of versnelling) van een serie lineair een-massa-veer-demper systemen met variabele eigenfrequentie die door dezelfde dynamische belasting in trilling zijn gebracht. De resulterende grafiek kan gebruikt worden om de responsie van een gegeven lineair systeem af te lezen, indien de natuurlijke frequentie bekend is. Het responsie spectrum bevat belangrijke informatie over de verdeling van trillingsenergie bij verschillende frequenties. |
| Spectrum           | Beschrijving van een willekeurig tijdssignaal in termen van een serie componenten elk met een eigen individuele frequentie, amplitude en evt. fase.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Trilvorm (mode)    | Een kenmerkend patroon dat door een trillend systeem wordt aangenomen waarin elk deeltje een harmonische beweging beschrijft met dezelfde frequentie. Twee of meer trilvormen kunnen in een systeem met meerdere vrijheidsgraden aanwezig zijn.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Versnelling        | De afgeleide van snelheid in de tijd (aangegeven als $dv / dt$ of $d^2x / dt^2$ ), meestal in een specifieke richting. Wordt normaal uitgedrukt in termen van $g$ ofwel zwaartekrachtenheid.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Versterking        | Proces waarbij de omvang van een veranderlijke variabele wordt verhoogd, zonder andere eigenschappen te veranderen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

### 3 Ontwerpprocedure

Een stijgend aantal trillingsproblemen zijn de laatste jaren geconstateerd bij voetgangersbruggen. Dit toont aan dat de voetgangersbruggen niet alleen meer voor statische belastingen, maar ook voor dynamische belastingen moeten worden ontworpen. Het ontwerp zou rekening moeten houden met de trillingsprestatie van de voetgangersbrug bij lopen op de brug. Het is belangrijk om op te merken dat er momenteel geen normen hiervoor beschikbaar zijn.

Vanuit ontwerpers standpunt, laat dit gebrek aan regelgeving een grote hoeveelheid vrijheid en daarmee een grote verscheidenheid van innovatieve brugconstructies toe. Het is niettemin van essentieel belang dat de brug aan de door de cliënt of de eigenaar gestelde comfort eisen voldoet. De vraag of de voetgangersbrug aan de comfortcriteria zal voldoen tijdens het trillen speelt een belangrijke rol in het ontwerpproces. Mogelijk dient het ontwerp daarom dempers te omvatten.

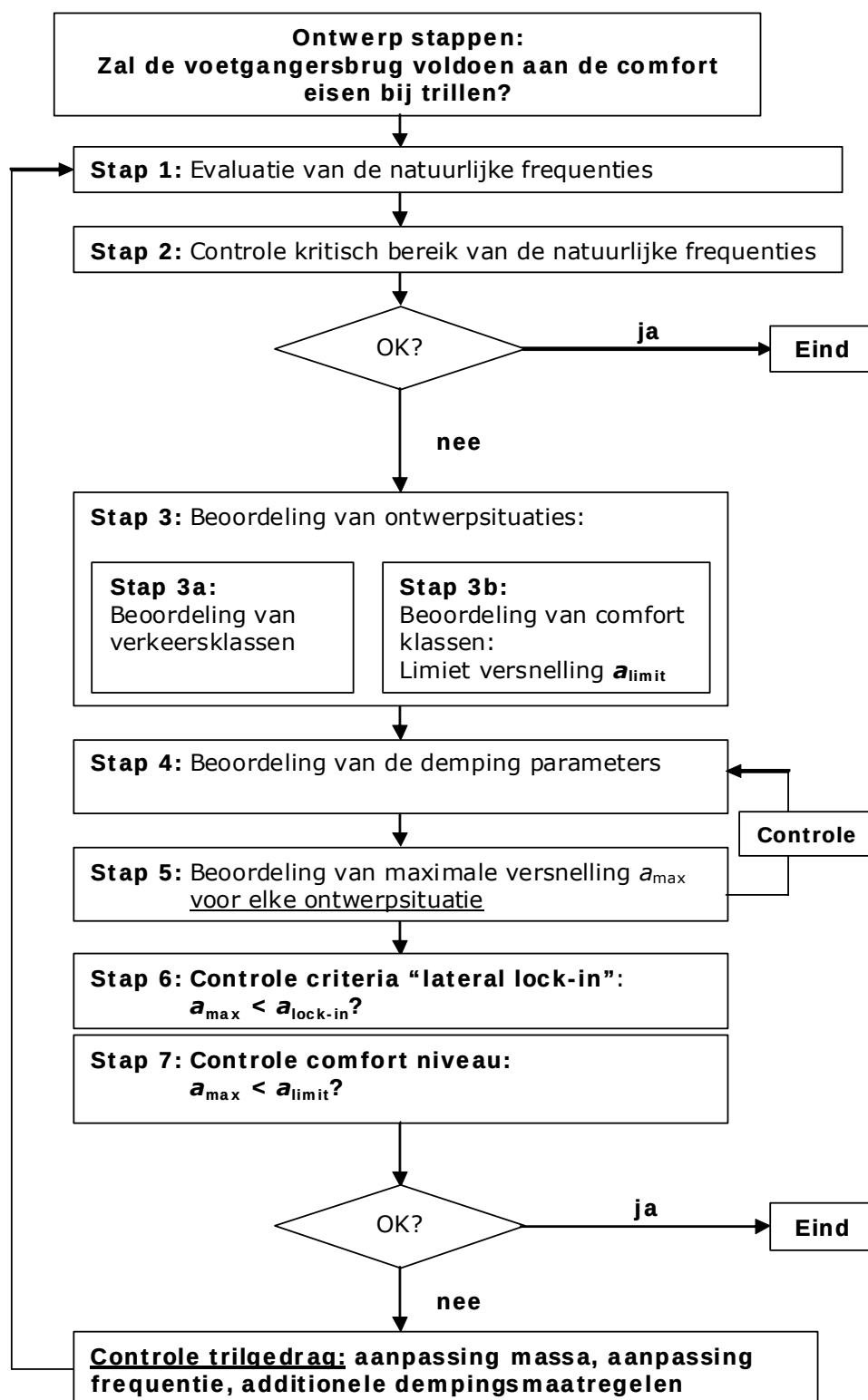
De algemene principes van de voorgestelde ontwerpmethodologie worden in Figuur 3-1 gegeven.



**Figuur 3-1: Ontwerpmethodologie**

Het stroomschema in Figuur 3.2 geeft aan hoe aan de hand van deze richtlijn het dynamisch gedrag van de voetgangersbrug kan worden gecontroleerd in de ontwerpfase. De diverse stappen die in het stroomschema worden vermeld zullen in hoofdstuk 4 worden besproken.

Veiligheidsproblemen door overbelasting of vermoeiing kunnen ook optreden. Hiermee moet ook rekening worden gehouden bij het ontwerp van voetgangersbruggen - deze richtlijn behandelt slechts omkeerbare belastingen in de bruikbaarheids grenstoestand, zoals in de Eurocodes gedefinieerd. De regels van het ontwerp voor overbelasting en vermoeiing worden elders gegeven. Er wordt op gewezen dat alle gebruikelijke controles volgens de normen zoals voor de bruikbaarheids grenstoestand (SLS) en uiterste grenstoestand (ULS) altijd moeten worden uitgevoerd.



Figuur 3-2: Flowdiagram voor het gebruik van deze handleiding

## 4 Ontwerpstappen

### 4.1 Stap 1: Evaluatie van natuurlijke frequenties

Er zijn verschillende manieren om de natuurlijke frequentie van een voetgangersbrug tijdens ontwerp (vooral voor de inleidende controle van de brugtrilling) te berekenen, b.v.:

- Eindige elementen (FE) methode
- De standaard formules b.v. voor stralen, kabels en platen.

Het moet in het achterhoofd worden gehouden dat de materiaaleigenschappen, de complexiteit van de constructie, het type dek en onderdelen op het dek, de randvoorwaarden en de reling verschillen tussen de berekende natuurlijke frequenties en de gemeten frequenties van de echte constructie kunnen veroorzaken.

De massa van de voetgangers moet worden meegenomen in de berekening als de modale massa van de voetgangers meer dan 5% van de modale dekmassa bedraagt.

### 4.2 Stap 2: Controle kritische bereik van natuurlijke frequenties

De kritische gebieden voor de natuurlijke frequenties  $f_i$  van voetgangersbruggen onder loopbelasting zijn:

- voor verticale en longitudinale trillingen:

$$1,25 \text{ Hz} \leq f_i \leq 2,3 \text{ Hz}$$

- voor zijdelingse trillingen:  $0,5 \text{ Hz} \leq f_i \leq 1,2 \text{ Hz}$

Voetgangersbruggen met frequenties voor verticale en longitudinale trillingen tussen

$$2,5 \text{ Hz} \leq f_i \leq 4,6 \text{ Hz}$$

kunnen in resonantie worden gebracht door de tweede boventoon van de loopbelasting. In dat geval, de volgende kritische gebied voor verticale en longitudinale trillingen moet worden gehanteerd:

$$1,25 \text{ Hz} \leq f_i \leq 4,6 \text{ Hz}$$

N.B: Een verticale aanstoting door de tweede boventoon van de loopbelasting kan plaatsvinden. Tot op heden is er geen aanwijzing in literatuur van hinderlijke trillingen van loopbruggen als gevolg van de tweede boventoon van de loopbelasting.

### 4.3 Stap 3: Beoordeling van ontwerpsituaties

Het ontwerp van een voetgangersbrug begint met het specificeren van verscheidene significante ontwerpsituaties - reeksen fysieke voorwaarden die de echte voorwaarden vertegenwoordigen die tijdens een bepaald tijdsinterval voorkomen. Elke ontwerpsituatie wordt bepaald door een verwachte verkeersklasse (cf. sectie 4.3.1) en een gekozen comfortniveau (cf. sectie 4.3.2).

Er zijn ontwerpsituaties die eens in het leven van een voetgangersbrug voorkomen, zoals de inauguratie van de brug, en anderen die dagelijks zullen voorkomen, zoals forenzenverkeer. Tabel 4.1 geeft een overzicht van één of andere typische verkeerssituatie die op voetgangersbruggen kan voorkomen. Het verwachte type voetverkeer en de verkeersdichtheid, in combinatie met de comforteisen, hebben een significant effect op het vereiste dynamische gedrag van de brug.

**Tabel 4-1: Typische verkeerssituaties**

|                                                                                     |                                                                                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | <p>Individuele voetgangers en kleine groepen</p> <p>Aantal voetgangers: 11</p> <p>Groep omvang: 1-2 P</p> <p>Dichtheid: 0,02 P/m<sup>2</sup></p> <p>N.B.: P = voetganger</p> |
|    | <p>Zeer weinig verkeer</p> <p>Aantal voetgangers: 25</p> <p>Groep omvang: 1-6 P</p> <p>Dichtheid: 0,1 P/m<sup>2</sup></p>                                                    |
|  | <p>Weinig verkeer</p> <p>Hier: event verkeer</p> <p>Aantal voetgangers: 60</p> <p>Groep omvang: 2-4 P</p> <p>Dichtheid: 0,2 P/m<sup>2</sup></p>                              |
|  | <p>Uitzonderlijk zwaar verkeer</p> <p>Hier: verkeer bij brugopening</p> <p>Dichtheid: &gt; 1,5 P/m<sup>2</sup></p>                                                           |

Om inzicht in het dynamisch gedrag van een brug te verkrijgen, wordt aanbevolen om verschillende mogelijke ontwerpsituaties te definiëren. Een voorbeeld hiervan wordt in Tabel 4-2 gegeven.

**Tabel 4-2: Voorbeeld van een specificatie van maatgevende ontwerpsituaties**

| Ontwerp-situatie | Beschrijving      | Verkeersklasse (cf. 4.3.1) | Herhalingstijd                | Comfort Klasse (cf. 4.3.2) |
|------------------|-------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| 1                | brugopening       | TC4                        | een keer in hele levenscyclus | CL3                        |
| 2                | Pendelaar verkeer | TC2                        | dagelijks                     | CL1                        |
| 3                | Weekend wandelaar | TC1                        | wekelijks                     | CL2                        |
| ⋮                | ⋮                 | ⋮                          | ⋮                             | ⋮                          |

### 4.3.1 Stap 3a: Beoordeling van verkeersklassen

Voetganger verkeersklassen en bijbehorende stroom dichtheden zijn in Tabel 4-3 aangegeven.

**Tabel 4-3: Voetganger verkeersklassen en dichtheden**

| Verkeers-klasse | Dichtheid $d$<br>( $P$ = voetganger)     | Beschrijving                                                                                           | Kenmerken                                                                                               |
|-----------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| TC 1*)          | groep van 15 $P$ ;<br>$d = 15 P / (B L)$ | Zeer weinig verkeer                                                                                    | ( $B$ =breedte brugdek;<br>$L$ =lengte brugdek)                                                         |
| TC 2            | $d = 0,2 P/m^2$                          | Weinig verkeer<br> | Comfortabel en vrij lopen<br>Inhalen is mogelijk<br>Individuele voetgangers kiezen zelf eigen looptempo |

| Verkeers-<br>klasse | Dichtheid $d$<br>( $P$ =<br>voetganger) | Beschrijving                                                                                              | Kenmerken                                                                       |
|---------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| TC 3                | $d = 0,5 P/m^2$                         | Zwaar verkeer<br>       | Vrij lopen nog<br>onbelemmerd<br>Inhalen kan af en<br>toe niet moeilijk<br>zijn |
| TC 4                | $d = 1,0 P/m^2$                         | Zeer zwaar verkeer<br> | Beperkte<br>bewegingsvrijheid<br>Lopen verhinderd<br>Inhalen niet<br>mogelijk   |
| TC 5                | $d = 1,5 P/m^2$                         | Uitzonderlijk zwaar verkeer                                                                               | Lopen<br>onaangenaam<br>Mensenmenigte<br>Looptempo niet<br>zelf te bepalen      |

\*) Een equivalente stroom mensen voor verkeersklasse TC1 wordt verkregen door het aantal voetgangers te delen door de lengte  $L$  en breedte  $B$  van het brugdek.

Voetgangersformaties, processies of marcheren door soldaten worden niet meegenomen in de algemene verkeersklasse indeling, maar eisen additionele aandacht in het ontwerp.

#### 4.3.2 Stap 3b: Beoordeling van comfort klassen

Criteria voor voetgangerscomfort worden meestal in termen van een limiet versnelling van de brug uitgedrukt. Vier comfortclasses worden aanbevolen in deze richtlijn, zie Tabel 4-4.

**Tabel 4-4: Gedefinieerd comfort classes met bijbehorende versnellingsbereik**

| Comfort klasse | Comfortgraad | Verticale $a_{\text{limit}}$ | Laterale $a_{\text{limit}}$ |
|----------------|--------------|------------------------------|-----------------------------|
| CL 1           | Maximale     | $< 0,50 \text{ m/s}^2$       | $< 0,10 \text{ m/s}^2$      |

| Comfort klasse | Comfortgraad         | Verticale $a_{\text{limit}}$ | Laterale $a_{\text{limit}}$  |
|----------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|
| CL 2           | Middel               | 0,50 – 1,00 m/s <sup>2</sup> | 0,10 – 0,30 m/s <sup>2</sup> |
| CL 3           | Minimaal             | 1,00 – 2,50 m/s <sup>2</sup> | 0,30 – 0,80 m/s <sup>2</sup> |
| CL 4           | Onacceptabele hinder | > 2,50 m/s <sup>2</sup>      | > 0,80 m/s <sup>2</sup>      |

N.B.: De gegeven versnellingslimieten zijn alleen als comfort criteria te hanteren; lock-in criteria voor horizontale trillingen zijn in paragraaf 4.6 gegeven.

#### 4.4 Stap 4: Beoordeling van damping parameters

De hoeveelheid damping is zeer significant in de evaluatie van de amplitude van de schommelingen die door voetgangers worden veroorzaakt. De vermindering van trillingen, d.w.z., de energiedissipatie binnen de constructie, hangt zowel van de intrinsieke damping van bouwmaterialen af, die van verdeelde aard zijn, maar ook van het lokale effect van lagers of andere controleapparaten. Additionele damping komt ook van niet-structurele elementen, zoals leuningen en het brugdek.

Over het algemeen, hangt de hoeveelheid damping van het niveau van de trillingen af, aangezien grotere trillingen meer wrijving tussen structurele en niet-structurele elementen en lagers veroorzaakt.

De co-existentie van diverse mechanismen van dissipatie binnen de constructie maakt het uitdempen een complex fenomeen. De nauwkeurige karakterisering hiervan kan eigenlijk alleen worden genomen op basis van metingen aan de echte voetbrug, met inbegrip van leuningen en andere installaties.

Flexibele en lichte bruggen worden ook beïnvloed door de wind, wat tot aerodynamische damping kan leiden. Een toename in wind snelheid kan tot een toename in aerodynamische damping leiden. In geval van wind studies is deze aerodynamische damping een belangrijke factor, maar voor de evaluatie van voetganger geïnduceerde trillingen speelt deze geen rol.

##### 4.4.1 Damping model

Voor het ontwerp en de numerieke modellering, is het noodzakelijk om een model te specificeren en de overeenkomstige parameters te bepalen. De gemeenschappelijke benadering gebruikt lineaire viskeuze dempers (soms dashpot dempers genoemd), wat impliceert dat de toename van de damping krachten evenredig is aan de verplaatsingsnelheid. Dit model heeft het voordeel dat het tot lineaire dynamische evenwichtsvergelijkingen leidt, waarvan de analytische oplossing gemakkelijk kan worden verkregen. Nochtans, benadert het alleen de echte damping van een constructie voor lage trillingniveaus.

Het toevoegen van controlesystemen (cf. sectie 6.4.3) kan tot constructies leiden waarvoor de dampingmatrix niet meer evenredig is en daardoor is de conventionele modale analyse niet meer toepasbaar. Voor het tunen van het demper systeem en de berekening van de responsie van de gedempte

constructie zijn dan krachtigere algoritmes nodig, iteratieve oplossingen gebaseerd op directe integratie methoden, of op een "state-space" beschrijving.

#### 4.4.2 Dampingverhoudingen voor gebruiksbelastingen

Voor het ontwerp van voetgangersbruggen met het oog op comfort worden de in Tabel 4-5 aangegeven dampingverhoudingen aanbevolen (overgenomen uit de Eurocode).

**Tabel 4-5: Dampingverhoudingen voor verschillende constructie materialen noodzakelijk voor bruikbare condities**

| Type constructie                   | Minimum $\xi$ | Gemiddeld $\xi$ |
|------------------------------------|---------------|-----------------|
| Gewapend beton                     | 0,80%         | 1,3%            |
| Voorgespannen beton                | 0,50%         | 1,0%            |
| Composiet staal-beton              | 0,30%         | 0,60%           |
| Staal                              | 0,20%         | 0,40%           |
| Hout                               | 1,0%          | 1,5%            |
| Hangbrug, kettingbrug <sup>1</sup> | 0,70%         | 1,0%            |

#### 4.4.3 Dampingverhoudingen bij grote trillingsamplitudes

Intentionele belastingen kunnen grote trillingsniveaus produceren, die tot hogere dampingverhoudingen kunnen leiden, zie Tabel 4-6.

**Tabel 4-6: Dampingverhoudingen voor verschillende constructie materialen bij grote trillingsamplitudes**

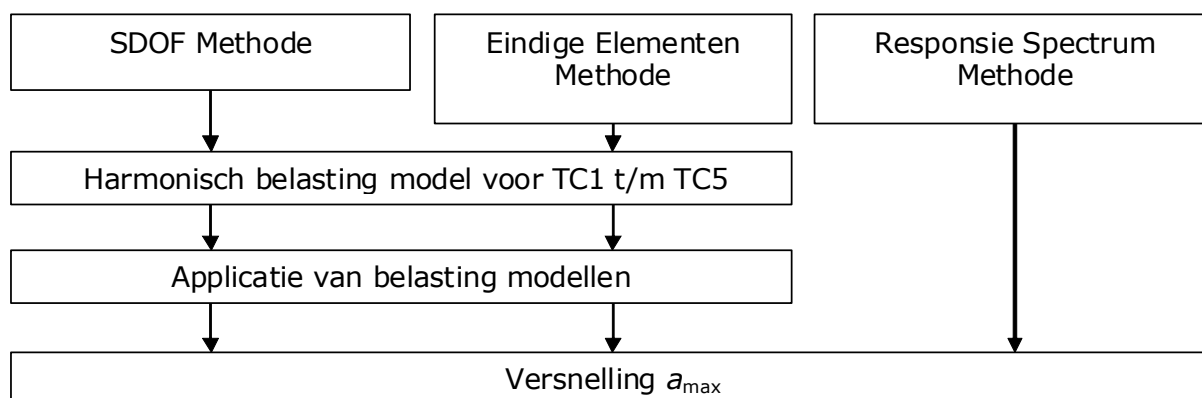
| Type constructie            | Dampingverhouding $\xi$ |
|-----------------------------|-------------------------|
| Gewapend beton              | 5,0%                    |
| Voorgespannen beton         | 2,0%                    |
| Staal, gelaste verbindingen | 2,0%                    |
| Staal, bout verbindingen    | 4,0%                    |
| Gewapende elastomeren       | 7,0%                    |

<sup>1</sup> Hier is de term kettingbrug voor het engelse term "stress-ribbon bridge" of "stressed-ribbon bridge".

## 4.5 Stap 5: Beoordeling van de maximum versnelling

Als een of meer ontwerpsituaties gedefinieerd zijn (cf. sectie 4.3) en als de dampingverhoudingen vastgelegd zijn (cf. sectie 4.4), dan kan de maximale versnelling  $a_{\max}$  worden bepaald voor elk ontwerpsituatie.

Er zijn verschillende methodes om de versnelling van de brug te berekenen; hier wordt aanbevolen om een van de methodes in Figuur 4-1 te gebruiken. Elk van deze methodes zal in de volgende paragrafen besproken worden.



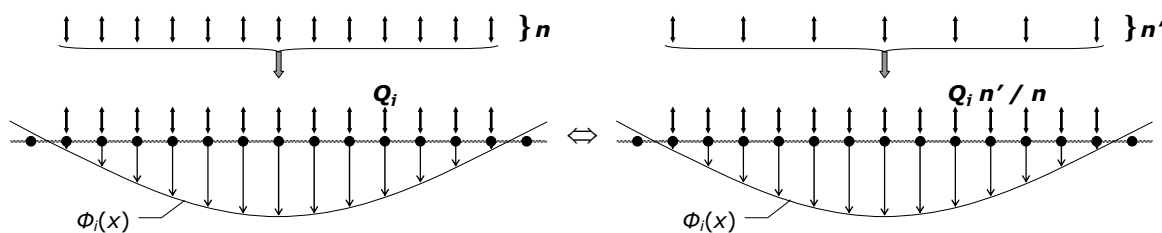
**Figuur 4-1: Verschillende methodes voor de berekening van de versnelling**

N.B.: Het is belangrijk om te verifiëren of de versnelling die berekend is, met de aangenomen waarde van de dampingverhouding voor normale of grote trillingsamplitudes (zie paragraaf 4.4) overeenkomt met de werkelijke optredende versnelling (zie hoofdstuk 5). Uit ervaring blijkt dat het heel moeilijk is om de dampingverhouding van de uiteindelijke brug te voorspellen. De berekende damping heeft dus een grote spreiding en hierdoor ook de berekende versnelling.

### 4.5.1 Harmonische belastingsmodellen

#### 4.5.1.1 Equivalent aantal voetgangers voor stromen

Als men een model van de brug heeft opgesteld en de ontwerpsituaties met bijbehorende belastingen en dampingverhoudingen heeft gedefinieerd, dan kan de brugresponsie berekend worden. Harmonische belastingsmodellen zijn nodig om de versnelling aan de hand van eindige elementen analyse of aan de hand van de SDOF methode (zie paragraaf 4.5.1.3) te bepalen. Een stroming die uit  $n$  "toevallige" voetgangers bestaat, wordt gemodelleerd met behulp van een equivalente stroming van  $n'$  gesynchroniseerde voetgangers (zie Figuur 4-2). De voetgangers in deze equivalente stroming zijn alleen met elkaar gesynchroniseerd, maar niet met de eventuele trilling van de constructie. Beide stromingen hebben hetzelfde effect op de constructie, echter de equivalente vorm kan als een deterministische belasting worden gemodelleerd.



**Figuur 4-2: Equivalentie van stromen (hierin is  $\phi_i(x)$  de trillingsvorm).**

De beoordeling van de responsie aan de hand van een gedistribueerde harmonische belasting (overeenkomend met het equivalente aantal voetgangers op vaste punten) in plaats van de echte stroming is toereikend ten aanzien van het praktische ontwerp van voetgangersbruggen.

Het is noodzakelijk om bewust te zijn van het bereik van frequenties waarop de berekening betrekking heeft. De invloed die de constructie op het gedrag van voetgangers kan hebben, wordt in deze berekeningen niet meegenomen, en dit kan leiden tot een onderschatting van de responsie.

#### 4.5.1.2 Toepassing van belastingsmodellen

In deze richtlijn zijn harmonische belastingen gegeven voor elk van de verkeersklassen TC1 t/m TC5 (zie Tabel 4-3). Er zijn twee verschillende belastingsmodellen afhankelijk van de dichtheid van de stroming:

- Belastingsmodel voor TC1 t/m TC3 (dichtheid  $d < 1,0 \text{ P/m}^2$ )
- Belastingsmodel voor TC4 en TC5 (dichtheid  $d \geq 1,0 \text{ P/m}^2$ )

Beide modellen gaan uit van een gelijkmatig gedistribueerde harmonische belasting  $p(t)$  [ $\text{N/m}^2$ ] die de equivalente voetgangersstroom in verdere berekeningen vertegenwoordigd:

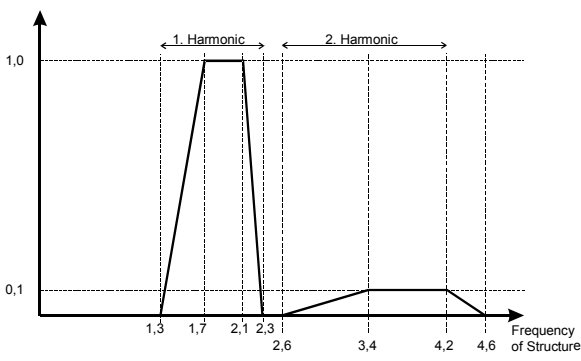
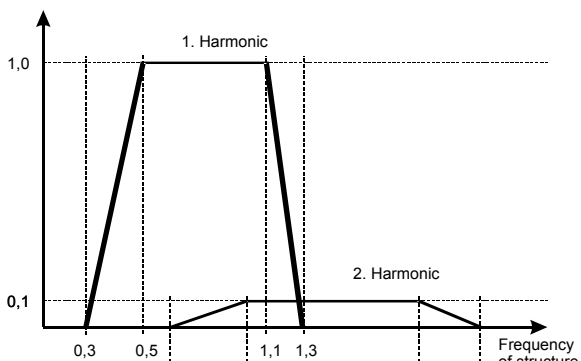
$$p(t) = P \times \cos(2\pi f_s t) \times n' \times \psi \quad \text{Vgl. 4-1}$$

waarin  $P \times \cos(2\pi f_s t)$  de harmonische belasting is van een enkele voetganger,

- $P$  is de amplitude van de kracht door een enkele voetganger met stapfrequentie  $f_s$ ,
- $f_s$  is de stapfrequentie, waarvan wordt aangenomen dat deze gelijk is aan de beschouwde natuurlijke frequentie van de brug,
- $n'$  is het equivalente aantal voetgangers op de belaste oppervlakte  $S$ ,
- $S$  is het oppervlakte dat belast wordt,
- $\psi$  is een reductie coëfficiënt voor de kans dat de stapfrequentie daadwerkelijk het kritische gebied met brug natuurlijke frequenties nadert.

De amplitude van de individuele voetganger  $P$ , het equivalente aantal voetgangers  $n'$  (95% bovengrens) en de reductiecoëfficiënt  $\psi$  zijn in Tabel 4-7 gedefinieerd.

**Tabel 4-7: Parameters voor belastingsmodellen van verkeersklassen TC1 tot TC5**

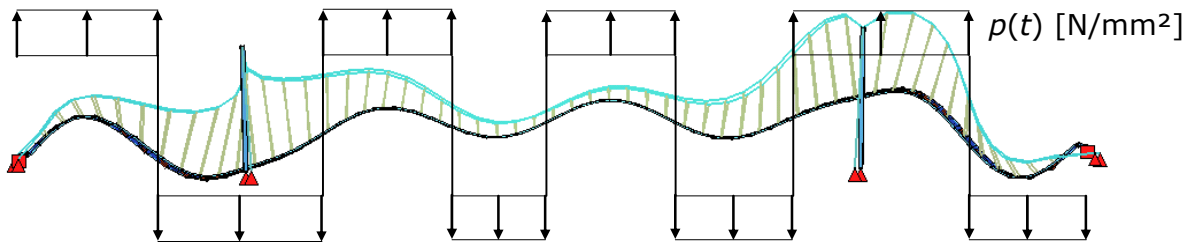
| $P$ [N]                                                                                                              |               |                                                                                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Verticaal                                                                                                            | Longitudinaal | Lateraal                                                                                            |
| 280                                                                                                                  | 140           | 35                                                                                                  |
| Reductiecoëfficiënt $\psi$                                                                                           |               |                                                                                                     |
| <p>Verticaal en longitudinaal</p>  |               | <p>Lateraal</p>  |
| Equivalent aantal voetgangers $n'$ op belast oppervlakte $S$ voor belastingsmodellen:                                |               |                                                                                                     |
| TC1 t/m TC3 (dichtheid $d < 1,0$ P/m <sup>2</sup> ): $n' = \frac{10,8\sqrt{\xi \times n}}{S}$ [1/m <sup>2</sup> ]    |               |                                                                                                     |
| TC4 en TC5 (dichtheid $d \geq 1,0$ P/m <sup>2</sup> ): $n' = \frac{1,85\sqrt{n}}{S}$ [1/m <sup>2</sup> ]             |               |                                                                                                     |

In de tabel is  $\xi$  het dempingverhouding en

$n$  het aantal voetgangers op het belaste oppervlak  $S$  ( $n = S \times d$ )

Het belastingsmodel (TC1) houdt rekening met de onbelemmerde beweging van voetgangers. Daarom is de synchronisatie tussen de voetgangers gelijk aan die van een stroom met een lage dichtheid. Bij hoge stroomdichtheid (TC4 en TC5) wordt lopen moeilijker waardoor de synchronisatie tussen voetgangers hoger wordt. Boven de grenswaarde van  $1,5$  P/m<sup>2</sup> wordt lopen onmogelijk, zodat dynamische effecten sterk worden gereduceerd. Als de stroming dichter wordt, dan wordt de correlatie van de noodtempo's van personen hoger, maar de dynamische belasting gaat omlaag.

In Figuur 4-3 wordt ter voorbeeld een harmonische belasting  $p(t)$  aangebracht op de constructie voor een gegeven trilvorm.

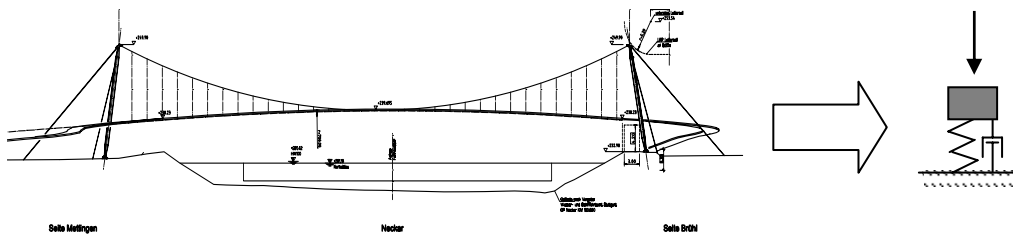


**Figuur 4-3: Toepassing van harmonische belasting volgens trilvorm  $\Phi(x)$**

De harmonische belastingsmodel is hier ontwikkeld als een model van stromingen lopende voetgangers in de hoofdrichting van de brug. Sommige bruggen kunnen gevoelig zijn voor hardlopen. Dit soort belasting wordt in [1] behandeld.

#### 4.5.1.3 SDOF methode

Door middel van een modale analyse, is het mogelijk het dynamisch gedrag van een constructie te beschrijven als een combinatie van de trillingen van verschillende één-massa-veer-demper systemen. Elk van deze systemen is een systeem met één vrijheidsgraad (SDOF<sup>2</sup>) en beschrijft een bepaalde trilvorm van de oorspronkelijke constructie. Elk SDOF systeem heeft een massa, damping en eigenfrequentie gelijk aan de modale massa, damping en frequentie van de trilvorm die hij beschrijft, zie Figuur 4-4.



**Figuur 4-4: Equivalente één-massa-veer-demper (SDOF) systeem voor één natuurlijke frequentie of trillingsvorm van de constructie.**

In de SDOF methode wordt de versnelling  $a_{\max}$  bij resonantie van een aantal equivalent SDOF systemen berekend. De te beschouwen SDOF systemen zijn degene die met een eigenfrequenties in het kritische bereik van natuurlijke frequenties.

De maximale versnelling  $a_{\max}$  bij resonantie wordt gegeven door:

$$a_{\max} = \frac{p^*}{m^*} \frac{n}{\delta} = \frac{p^*}{m^*} \frac{1}{2\xi} \quad \text{Vgl. 4-2}$$

waar  $p^*$  is de gegeneraliseerde belasting

$m^*$  is de gegeneraliseerde (modale) massa

$\xi$  is de dampingverhouding en

<sup>2</sup> Engels afkorting voor *single degree of freedom*.

$\delta$  is het logaritmisch decrement van de damping.

#### 4.5.2 Responsie Spectrum Methode voor voetgangersstromen

In het ontwerpstadium is het niet noodzakelijk om in alle gevallen een analyse in het tijdsdomein uit te voeren.

Het doel van de spectrum ontwerpmethode is om een simpele manier te bieden om de stochastische belasting en de systeem responsie te beschrijven zodat ontwerpwaarden met een bepaalde betrouwbaarheid bepaald kunnen worden.

Er wordt aangenomen dat:

- de gemiddelde stapfrequentie,  $f_{s,m}$ , van de voetgangersstroom overeenkomt met de natuurlijke frequentie van de brug in beschouwing,  $f_i$ ,
- de massa van de brug is gelijkmatig gedistribueerd,
- de trilvormen beschrijven een sinusvorm,
- er geen modale koppeling aanwezig is,
- het gedrag van de constructie lineair elastisch is.

De systeem respons – “maximale piek versnelling” – is gekozen als ontwerpwaarde. Tijdens de controle, wordt deze versnelling vergeleken met de toelaatbare versnelling volgens de gespecificeerde comfortklasse.

Voor verschillende voetgangers dichtheden kan de karakteristieke versnelling (95% van de maximale versnelling) aan de hand van de formules en tabellen hieronder bepaald worden.

Deze maximale versnelling is gedefinieerd door het product van een piek factor  $k_{a,d}$  en een standaard deviatie van de versnelling  $\sigma_a$ :

$$a_{\max,d} = k_{a,d} \sigma_a \quad \text{Vgl. 4-3}$$

NB. De piekfactor  $k_{a,d}$  wordt gebruikt voor de transformatie van de standaard deviatie van de respons  $\sigma_a$  naar de karakteristieke waarde  $a_{\max,d}$ . In bruikbare omstandigheden is de karakteristieke waarde gelijk aan de 95% waarde,  $k_{a,95\%}$

De standaard deviatie van de versnelling kan bepaald worden uit:

$$\sigma_a^2 = k_1 \xi^{k_2} \frac{C}{m} \frac{\sigma_F^2}{f_i^2} \quad \text{Vgl. 4-4}$$

$$\text{waarin } k_1 = a_1 f_i^2 + a_2 f_i + a_3$$

$$k_2 = b_1 f_i^2 + b_2 f_i + b_3$$

$a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$  zijn constanten

$f_i$  is de natuurlijke frequentie onder beschouwing (overeenkomend met de gemiddelde stap frequentie van de voetgangersstroom)

$\xi$  is de dampingverhouding

$C$  is een constante die het maximum van het belastingspectrum beschrijft

$\sigma_F^2 = k_F n$  is de variantie van de belasting (door lopen)

$k_F$  is een constante

$n = d \times L \times B$  is het aantal voetgangers op de brug met  
 $d$ : voetganger dichtheid,  $L$ : brug lengte,  $B$ : brug breedte

$m_i^*$  is de modale massa van de mode  $i$  onder beschouwing

De constanten  $a_1$  tot  $a_3$ ,  $b_1$  t/m  $b_3$ ,  $C$ ,  $k_F$  en  $k_{a,95\%}$  worden in Tabel 4-8 voor verticale versnellingen en in Tabel 4-9 voor laterale versnellingen gegeven.

**Tabel 4-8: Constanten voor verticale versnellingen**

| $d$ [P/m <sup>2</sup> ] | $k_F$                 | $C$  | $a_1$ | $a_2$ | $a_3$ | $b_1$ | $b_2$  | $b_3$  | $k_{a,95\%}$ |
|-------------------------|-----------------------|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------------|
| $\leq 0,5$              | $1,20 \times 10^{-2}$ | 2,95 | -0,07 | 0,60  | 0,075 | 0,003 | -0,040 | -1,000 | 3,92         |
| 1,0                     | $7,00 \times 10^{-3}$ | 3,70 | -0,07 | 0,56  | 0,084 | 0,004 | -0,045 | -1,000 | 3,80         |
| 1,5                     | $3,34 \times 10^{-3}$ | 5,10 | -0,08 | 0,50  | 0,085 | 0,005 | -0,060 | -1,005 | 3,74         |

**Tabel 4-9: Constanten voor laterale versnellingen**

| $d$ [P/m <sup>2</sup> ] | $k_F$                 | $C$  | $a_1$ | $a_2$ | $a_3$ | $b_1$ | $b_2$  | $b_3$  | $k_{a,95\%}$ |
|-------------------------|-----------------------|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------------|
| $\leq 0,5$              | $2,85 \times 10^{-4}$ | 6,8  | -0,08 | 0,50  | 0,085 | 0,005 | -0,06  | -1,005 | 3,77         |
| 1,0                     |                       | 7,9  | -0,08 | 0,44  | 0,096 | 0,007 | -0,071 | -1,000 | 3,73         |
| 1,5                     |                       | 12,6 | -0,07 | 0,31  | 0,120 | 0,009 | -0,094 | -1,020 | 3,63         |

Een alternatief om de minimale benodigde modale massa voor een gegeven comfortklasse  $a_{\text{limit}}$  eenvoudig te bepalen is:

$$m_i^* \geq \frac{\sqrt{n} (k_1 \xi^{k_2} + 1.65 k_3 \xi^{k_4})}{a_{\text{limit}}}$$

waarin  $m_i^*$  modale massa voor trillingsvorm  $i$  onder beschouwing

$n$  aantal voetgangers op de brug

$\xi$  dempingverhouding

$k_1$  tot  $k_4$  constanten (zie Tabel 4-10 voor verticale buiging en torsie modes en

Tabel 4-11 voor laterale buiging modes)

**Tabel 4-10: Constanten voor minimaal benodigde verticale modale massa**

| $d \text{ [P/m}^2\text{]}$ | $k_1$  | $k_2$ | $k_3$ | $k_4$ |
|----------------------------|--------|-------|-------|-------|
| $\leq 0,5$                 | 0,7603 | 0,468 | 0,050 | 0,675 |
| 1,0                        | 0,5700 |       | 0,040 |       |
| 1,5                        | 0,4000 |       | 0,035 |       |

**Tabel 4-11: Constanten voor minimaal benodigde laterale modale massa**

| $d \text{ [P/m}^2\text{]}$ | $k_1$  | $k_2$ | $k_3$ | $k_4$  |
|----------------------------|--------|-------|-------|--------|
| $\leq 0,5$                 | 0,1205 | 0,45  | 0,012 | 0,6405 |
| 1,0                        |        |       |       |        |
| 1,5                        |        |       |       |        |

De responsie spectrum methode is ontwikkeld voor bruggen die zich als een buigligger gedragen. Indien het mechanisch gedrag van de brug hiervan afwijkt, is het mogelijk dat deze methode niet meer van toepassing is.

## 4.6 Stap 6: Controle van criteria voor “lateral lock-in”

Het aantal voetgangers  $N_L$  dat tot een plotseling versterkte responsie van de brug in de laterale richting kan leiden wordt gedefinieerd door:

$$N_L = \frac{8\pi\xi m^* f}{k} \quad \text{Vgl. 4-5}$$

waarin  $\xi$  is dempingverhouding

$m^*$  is de modale massa

$f$  is de natuurlijke frequentie

$k$  is een constante (ongeveer 300 Ns/m over het frequentiebereik 0,5-1,0 Hz).

Een andere aanpak is om de versnellingsamplitude te definiëren waarbij het lock-in fenomeen kan ontstaan:

$$a_{lock \text{ in}} = 0,1 \text{ to } 0,15 \text{ m/s}^2 \quad \text{Vgl. 4-6}$$

Recente experimenten hebben de geschiktheid van beide aanpakken voor de beschrijving van lateral lock-in aangetoond.

N.B.: Voetgangersstromen die zich synchroniseren met verticale trillingen zijn tot heden niet geobserveerd bij voetgangersbruggen.

## 4.7 Step 7: Control van comfort niveau

Volgens het ontwerpschema in Figuur 3-2, moet de responsie voor de gespecificeerde ontwerpsituaties vergeleken worden met de limieten van de



gespecificeerde comfortklassen. Bij overschrijding van de limieten moeten maatregelen worden getroffen met het doel om het dynamisch gedrag van de brug te verbeteren. Deze maatregelen bestaan uit:

- het aanpassen van de massa
- het aanpassen van de eigenfrequentie
- het aanpassen of toevoegen van demping

Voor een bestaande brug is de meest eenvoudige aanpak gebaseerd op het toevoegen van demping, door middel van actieve of passieve dempingsystemen, of door middel van aanpassing of toevoeging van niet-dragende elementen zoals wegverhardingen, balustraden etc. (zie hoofdstuk 6).

## 5 Berekening van de dynamische eigenschappen van voetgangersbruggen

### 5.1 Inleiding

De experimentele karakterisering van het dynamisch gedrag van een voetgangersbrug kan een belangrijk onderdeel van het project zijn en kan worden uitgevoerd op basis van twee verschillende niveaus van complexiteit:

- **Niveau 1**- Identificatie van constructie parameters, met als doel het kalibreren van numerieke modellen en uiteindelijk het afstemmen van actief/passief dempingsystemen. De natuurlijke frequenties, de trillingsvormen en de dempingverhoudingen zijn de parameters van belang;
- **Niveau 2**- Meting van de brug responsie onder loopbelasting ten behoeve van de beoordeling van comfortcriteria en/of de correlatie met de gesimuleerde responsie.

Het gebruik van één van de bovengenoemde strategieën hangt van de kenmerken van de constructie en van de doelstellingen van de studie af.

**Niveau 2** metingen kunnen aan het eind van de bouw worden uitgevoerd om belangrijke informatie te verzamelen ten behoeve van een controle. Afhankelijk van de resultaten van deze tests, kan de brugeigenaar besluiten of om maatregelen wel of niet toe te passen. Er wordt hierbij opgemerkt dat het gebruik van experimentele tests om de comfortklasse van een specifieke voetgangersbrug te controleren vereist dat alle trillingsfenomenen en ontwerpsituaties, die in het ontwerp behandeld zijn, getoetst worden, rekening houdend met het feit dat meetwaarden betrekking op karakteristieke waarden moeten hebben.

**Niveau 1** metingen zijn nodig wanneer het duidelijk is dat het dynamische gedrag van de voetgangersbrug niet voldoet aan grenswaarden waardoor maatregelen noodzakelijk zijn. Het ontwerp van dempingsystemen vereist een zuivere kennis van het gedrag van de brug en zijn modale (dynamische) parameters.

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de richtlijnen voor het testen en analyseren van voetgangersbruggen.

### 5.2 Responsiemetingen



**Level 2** metingen moeten het volgende beschouwen:

1. Identificatie van kritische natuurlijke frequenties;
2. Identificatie van dempingverhouding;
3. Meting van de responsie door een enkele voetganger;
4. Meting van de responsie door een klein groep voetgangers;
5. Meting van de responsie door een continu stroom van voetgangers.

De controle van de resultaten van deze tests voor een bepaalde voetbrug moet rekening houden met het specifiek gebruik van de brug.

### 5.2.1 Metingen van de responsie op omgevingsbelasting ten behoeve van identificatie van de kritische natuurlijke frequenties

De tests zouden bij voorkeur op de brug moeten worden uitgevoerd tijdens een tijdelijk afsluiting. De brug moet zodanig geïnstrumenteerd worden dat sensoren toegepast worden op die secties waar de grootste modale responsie verwacht wordt. Ten behoeve hiervan kan een voorlopige dynamische analyse van de brug worden uitgevoerd.

### 5.2.2 Ruwe meting van dempingverhouding voor kritische natuurlijke frequenties

Ruwe ramingen van de dempingverhouding voor kritische natuurlijke frequenties kunnen uit een eenvoudige vrije trillingstest worden verkregen. Hierin gaat een voetganger springen op een vaste plaats met een bepaald tempo om de brug in trilling te brengen. Na een aantal sprongen, wordt de actie plotseling onderbroken en de vrije trillingsresponsie wordt gemeten. Dit proces zou een paar keer moeten worden herhaald, om gemiddelde waarden van de dempingverhouding als functie van trillingsamplitude te bepalen.

### 5.2.3 Meting van de responsie door een enkele voetganger

De hierboven beschreven tests leveren een update van de verwachte kritische natuurlijke frequenties. De responsie wordt nu gemeten bij de relevante secties (de sectie met de grootste trillingsamplitude voor elke kritieke frequentie), als gevolg van het lopen van één enkele voetganger over de brug. Verschillende vormen van lopen zouden, als functie van de frequenties van belang, moeten worden onderzocht:

- lopen, voor kritische natuurlijke frequenties onder 2,5 Hz;
- lopen, of hardlopen voor kritische natuurlijke frequenties tussen 2 Hz en 3 Hz;
- rennen, voor natuurlijke frequenties boven 3 Hz.

Gezien de willekeurige aard van de belasting, moeten een aantal tests voor elke combinatie van frequentie en lopen worden uitgevoerd (een typisch aantal combinaties is 5). Een metronoom kan worden gebruikt om de correcte loop tempo te verzekeren. De maximum versnelling en de dynamische verplaatsing moeten voor elke verzamelde reeks worden bepaald. Het gewicht van de

voetganger, die voor de brug excitatie zorgt, moet worden genoteerd. Indien de brug een niet-symmetrische helling heeft, dan moet de responsie worden bepaald bij aflopen van de helling.

#### 5.2.4 Meting van de responsie door een groep voetgangers

De responsie dient gemeten te worden voor de volgende twee condities:

- lopen/rennen onder normale omstandigheden;
- lopen/rennen met als doel grote verplaatsingen te veroorzaken (vandalisme).

Er moet gestreefd worden naar een groep van 10 voetgangers bij een dek breedte van minder dan 2.5 m en 15 voetgangers bij grotere breedtes. De responsie moet worden gemeten gebaseerd op de specificatie die in sectie 5.2.3 voor het oversteken door één voetganger. De responsie verbonden aan de gesynchroniseerde groep moet worden verzameld, opnieuw gebruik makend van een metronoom om synchronisatie bij een bepaalde frequentie te bereiken.

Het is verwacht dat de aanwezigheid van mensen op het dek tot hogere dempingverhoudingen kan leiden. Omdat demping voor grotere trillingsamplitudes nog hoger kan zijn, wordt voorgesteld om metingen van de vrije trillingsresponsie te verrichten na excitatie van de brug door de groep op een vaste positie (springen).

#### 5.2.5 Meting van de responsie door een continu stroom van voetgangers

De meting van de responsie door een continue stroom van voetgangers is ook van belang voor het vastleggen van het gedrag van de brug onder verschillende omstandigheden. Deze meting is zeker aan te bevelen bij trillingsgevoelige bruggen ofwel bruggen waarbij synchronisatie/resonantie kan optreden. De meetprocedure is gelijk aan die voor de enkele voetganger en voor een groep zoals beschreven in paragrafen 5.2.3 en 5.2.4.

### 5.3 Parameter identificatie

Het bepalen van modale parameters (de natuurlijke frequenties, de trillingsvormen en dempingverhoudingen) op een brug wordt verricht door middel van de hierboven genoemde tests (**Niveau 1**). Een klassieke beproevingsmethode op basis van gedwongen trillingen of een identificatie op basis van vrije trilling of omgevingsbelasting kunnen hiervoor worden toegepast. Deze twee vormen van beproeven worden hieronder kort behandeld.

#### 5.3.1 Metingen aan de hand van gedwongen trillingen

Metingen aan de hand van gedwongen trillingen leveren de meest nauwkeurige resultaten op, doordat er van gecontroleerde inputs en outputs wordt uitgegaan. Dit is van belang voor het schatten van de demping, waarbij meetonzekerheden een grote invloed kunnen hebben. De analyse techniek die gebruikt wordt om parameters te bepalen is afhankelijk van het type excitatie dat gebruikt wordt. Omdat de input energie bij lage natuurlijke frequenties zeer laag is, kan de kwaliteit van het gemeten signaal slecht zijn (lage signaal-ruis verhouding).

De excitatie bron kan bij dit soort testen geleverd worden door een

- hamer en
- elektromagnetische excitator,

en worden verder beschreven in paragraaf 5.4.2.1.

### 5.3.2 Metingen aan de hand van door omgevingsbelasting veroorzaakte trillingen

Bij metingen aan de hand van excitatie door omgevingsbelastingen wordt aangenomen dat de frequentie inhoud van de omgevingsbelasting relatief constant is in het onderzochte frequentiebereik. Ondanks dat deze aanname meestal niet geldig is, zijn deze soort metingen zeer aantrekkelijk en worden steeds meer gebruikt vanwege de beperkte instrumentatie die nodig is, en de zeer hoge nauwkeurigheid van sensoren. De nauwkeurigheid van met deze meettechnieken geschatte dempingverhoudingen kan zeer laag zijn.

### 5.3.3 Metingen aan de hand van vrije trilling

Bij een vrije trillingsmeting wordt de responsie van de constructie gemeten na het aanbrengen van een voorbelasting op de constructie. Deze voorbelasting kan bijvoorbeeld worden aangebracht door middel van een gespannen kabel. Dit soort metingen zijn relatief eenvoudig en kunnen nauwkeurige schattingen van demping en van de trilvormen geven en kunnen in plaats van gedwongen trillingsmetingen uitgevoerd worden. De resultaten hiervan pakken normaal gesproken beter uit dan de resultaten van de meting aan de hand van omgevingsbelastingen.

Voor een betrouwbare schatting van de demping, wordt aanbevolen om metingen te verrichten bij wind snelheden niet hoger dan 2-5 m/s.

## 5.4 Instrumentatie

### 5.4.1 Responsie meetinstrumenten

Toelaatbare grenswaarden voor comfort van voetgangers zijn in termen van versnelling vastgesteld, dus de gangbare meetresponsie grootheid is versnelling.

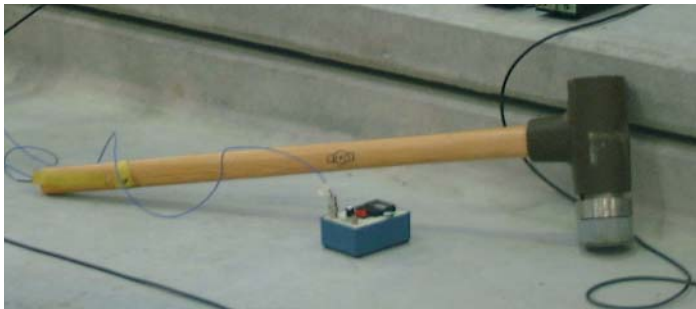
Versnellingsopnemers zijn sensoren die een elektrisch signaal produceren dat evenredig is met de versnelling binnen een gegeven frequentiebereik en kunnen op verschillende mechanische principes gebaseerd zijn. Voor de meeste voetgangersbruggen ligt het belangrijke frequentiebereik tussen 0,5 – 20 Hz. Gebruikelijke specificaties voor versnellingsopnemers zijn :

- Frequentiebereik (met 5% lineariteit): 0,1 – 50 Hz;
- Minimale gevoeligheid: 10 mV/g
- Bereik:  $\pm 0,5$  g

### 5.4.2 Meetinstrumenten ten behoeve van parameter identificatie

#### 5.4.2.1 Excitatie bronnen

Voor gedwongen trillingsmetingen van voetgangersbruggen, mogelijke excitatie middelen zijn een hamer (zie Figuur 5-1) of een shaker (zie Figuur 5-2).



**Figuur 5-1: Hamer voor civiel technische toepassingen**



**Figuur 5-2: Elektromagnetische vibrator voor civiel technische toepassingen. Verticale opstelling**

N.B.: Voor meer details over deze excitatie bronnen zie de achtergrond documentatie [1].

#### 5.4.2.2 Krachtopnemers

Een belangrijk aspect bij een gedwongen trillingsmeting is de meting van input krachten die door voetgangers, zowel alleen als in een groep, worden veroorzaakt.

De meting van de belasting, die door een voetganger veroorzaakt wordt, kan door middel van een geïnstrumenteerd platform geschieden. Voor een groep lopende mensen, is de graad van synchronisatie van voetgangers ook van belang. Deze kan door middel van video opnames en image processing beoordeeld worden.

## 6 Beperking van de dynamische responsie

### 6.1 Inleiding

In de in hoofdstuk 3 beschreven ontwerpcontrole wordt de dynamische responsie vergeleken met grenswaarden voor de gespecificeerde comfortklassen. Het overschrijden van de grenswaarden betekend dat maatregelen moeten worden genomen, om het dynamisch gedrag van de brug te verbeteren. Tot deze maatregelen behoren het aanpassen van de massa, eigenfrequentie en demping.

### 6.2 Aanpassing van de massa

Voor zeer lichte bruggen kan het gebruik van massieve betonnen dekplaten het dynamisch gedrag verbeteren als gevolg van de verhoogde modale massa. Deze aanpak kan zeer effectief zijn bij kettingbruggen.

### 6.3 Aanpassing van de eigenfrequentie

Normaal gesproken, wordt de stijfheid van een brug verhoogd met als doel het doen toenemen van de eigenfrequentie zo dat deze zich buiten de kritisch gebieden voor zowel verticale als laterale beweging bevindt. Omdat eigenfrequentie evenredig is met de wortel van de verhouding tussen stijfheid en massa, zijn behoorlijke constructieve aanpassingen nodig om de eigenfrequentie voldoende te verhogen. Bij modern bruggenontwerp, waar het doel is om lichte en elegante constructies te bouwen, zijn dergelijke aanpassingen niet mogelijk na de bouw, maar kunnen wel in de ontwerpfase meegenomen worden.

### 6.4 Aanpassing van demping

#### 6.4.1 Inleiding

Het verhogen van demping in een brug hoort tot de mogelijkheden om de dynamische effecten van voetgangers te beperken. Voor een bestaande brug is de simpelste benadering om de demping te verhogen, door specifieke onderdelen van de brug aan te passen of door middel van een externe dempingapparaat.

Het gebruik van externe dempingapparaten om overmatige trilling tegen te gaan kan een effectieve oplossing zowel in termen van kosten als betrouwbaarheid. Deze apparaten kunnen gebaseerd worden op actieve, semiactieve of passieve controle technieken. Aspecten zoals kosten, onderhoud en praktische ervaring wijzen erop dat de meest gebruikelijke optie die van passieve dempers is, zoals "tuned mass" dempers (TMD), pendulum dempers, "tuned liquid column" dempers (TLCD) of "tuned liquid" dempers (TLD). De meeste populaire zijn viskeuze dempers en TMDs.

#### 6.4.2 Eenvoudige maatregelen

Leuningen worden meestal als niet dragende element beschouwd waarvan de specificaties gebaseerd zijn op architectonische beschouwingen. Dit soort elementen kunnen echter een bijdrage leveren om de stijfheid en demping van, met name lichte, constructies te verhogen. Het gebruik van draadhekwerk blijkt

een belangrijke bijdrage te leveren aan demping vanwege de wrijving tussen de draden. Het is echter niet mogelijk deze bijdrage te kwantificeren, omdat de mate van demping hiervan sterk afhankelijk is van de trillingsamplitude.

Het gebruik van elastomeren in opleggingen en als wegverharding kan leiden tot een verhoging van de demping van de voetgangersbrug. Eigenschappen hiervan kunnen echter met de tijd verslechteren en regelmatig onderhoud zal nodig zijn.

Een andere mogelijkheid is om boutverbindingen in plaats van gelaste verbindingen toe te passen.

### 6.4.3 Additionele dempingapparaten

Tabel 6-1 geeft een aantal voorbeelden van constructies waar dempingmaatregelen geïmplementeerd zijn met een beschrijving en het effect daarvan.

**Tabel 6-1: Voetgangersbruggen waarin dempingmaatregelen zijn toegepast**

| Brug                      | Aantal overspanningen / lengte [m] | Type                                    | Beheerste frequenties [Hz]          | Dominante trillingsrichting | Toegepast type dempingsmaatregel                                                                                                                                                         | Effect van het dempings-systeem op het globale gedrag                           |
|---------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| T-Bridge, Japan           | 2 span, 45+134                     | Tui brug met, continue stalen steunbalk | 0,93                                | Laterale                    | "Tuned liquid" dempers of sloshing type, binnen kokerbalk. Totaal van 600 vaten gebruikte massa verhouding van 0,7% van gegeneraliseerd e massa laterale trillingsmode van de steunbalk. | laterale trillingsmode reductie van de steunbalk van ongeveer 8,3mm naar 2,9mm. |
| Millennium Bridge, London | 3 span, 108+144+80                 | Hang brug                               | 0,8 (1 <sup>e</sup> )<br>0,5<br>1,0 | Laterale                    | Viskeuze dempers and TMD voor horizontale beweging. Verticale TMD voor verticale beweging in gebied tussen 1,2 tot 2,0Hz                                                                 | Trillingen niet meer voelbaar                                                   |
| Forchheim Bridge, Germany | 1 span, 117,5                      | Tuibrug                                 | 1,0 tot 3,0                         | Verticale                   | 1 TMD                                                                                                                                                                                    |                                                                                 |

| Brug                         | Aantal overspanningen / lengte [m] | Type                  | Beheerste frequenties [Hz]                          | Dominante trillingsrichting        | Toegepast type dempingsmaatregel                                                   | Effect van het dempings-systeem op het globale gedrag                              |
|------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Solférino Bridge, Paris      | Hoofdoverspanning, 106             | Boog                  | 0,81<br>1,94<br>2,22                                | Laterale<br>Verticale<br>Verticale | 1 laterale TMD met massa 15000kg en 2 verticale TMDs met massa's 10000kg en 7600kg | Dempings-toename van 0,4% naar 3,5% (lateraal), van 0,5% naar 3% en 2% (verticaal) |
| Pedro e Inês Bridge, Coimbra | Hoofdoverspanning, 110             | Lage boog / steunbalk | 0,85<br>1,74;<br>1,80; 2,34;<br>2,74; 3,07;<br>3,17 | Laterale<br>Verticale              | 1 laterale TMD met 14800kg en 6 verticale TMDs                                     | Dempings-toename van 0,5% naar 4% en verticaal van 0,3%-2,2% naar 3%- 6%           |

N.B.: Meer informatie over de dempingsystemen die hieronder worden beschreven kan worden gevonden in het achtergronddocument [1].

#### 6.4.3.1 Viskeuze dempers

Viskeuze dempers (zie Figuur 6-1) dempen trillingen door vervorming van een vloeistof of een vaste stof.

De meest gebruikelijke dempers zijn schokdempers bestaande uit een zuiger die binnen een cilinder beweegt en hierdoor een vloeistof comprimeert. De demperkracht is afhankelijk van de viscositeit van de vloeistof en is recht evenredig met de relatieve snelheid van de beide uiteinden van de demper. De effectiviteit van een dergelijke demper is dus afhankelijk van de mogelijkheid om hem te bevestigen bij punten op de constructie met een significante relatieve trillingssnelheid. In sommige type dempers wordt de vloeistof door gaten geperst waardoor dissipatie door volumieke veranderingen ontstaat. Dit type demper is minder temperatuursgevoelig.

Viskeuze elastische dempers onderscheiden zich hiervan doordat zij energie dissiperen door afschuifvervorming van een vaste stof, in het algemeen een polymeer.



**Figuur 6-1: Voorbeeld van toepassing van viskeuze dempers.**

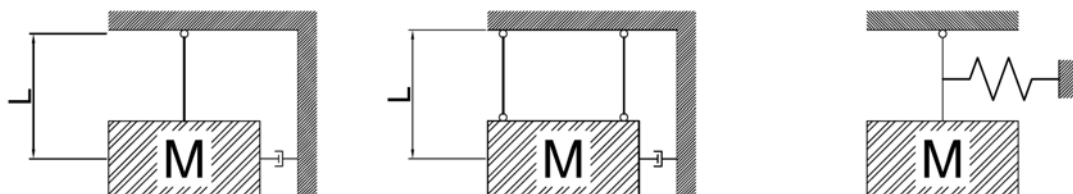
### 6.4.3.2 Tuned mass dampers

Tuned Mass Dampers (TMDs) bestaan uit geconcentreerde massa's die aan de constructie bevestigd zijn met veren en dempers. Deze systemen worden zodanig ontworpen dat de kritische frequentie tot twee nieuwe eigenfrequenties leidt (een boven en de andere onder de oorspronkelijke frequentie). De relatieve beweging tussen de constructie en de TMD zorgt voor energiedissipatie. Omdat de massa van de constructie vele malen groter is dan die van de TMD, ondergaat de TMD grotere verplaatsingen ten opzicht van de trilling van de constructie. Figuur 6-2 toont twee voorbeelden van TMDs, een verticaal en een horizontaal.

**Figuur 6-2: Voorbeelden van TMDs in voetgangersbruggen.**

### 6.4.3.3 Pendulum dampers

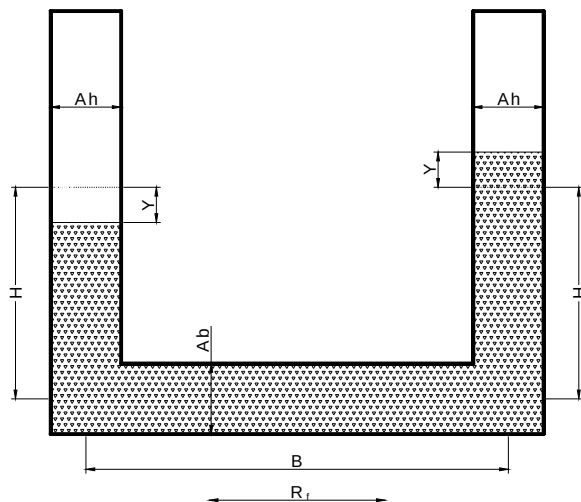
Pendulum dampers (zie Figuur 6-3) zijn een specifiek type TMD dat gebruikt worden om horizontale bewegingen tegen te gaan. Het verschil met een TMD ligt in het feit dat geen veren gebruikt worden, behalve bij gevallen waar frequenties hoger dan 1 Hz onderdrukt moeten worden. De massa bij dit soort dempingsystemen wordt meestal opgehangen met behulp van staaf elementen.

**Figuur 6-3: Voorbeeld van pendulum dampers**

### 6.4.3.4 "Tuned liquid column" dampers

Een Tuned Liquid Column Damper (TLCD) bestaat uit een U-vormige pijp waarbinnen zich een vloeistof bevindt. De eigenschappen van deze vloeistof worden zodanig gekozen dat de krachten aan de onderkant van het systeem, die ontstaan als gevolg van de beweging van de vloeistof, de horizontale beweging van zijn oplegging tegengaan. Het principe is dus identiek aan die van een TMD. Echter er zijn een aantal voordelen boven andere dempingsystemen zoals

eenvoud in het afstemmen van frequentie en demping, het plaatsen, het bouwen en bijna geen kosten voor onderhoud.

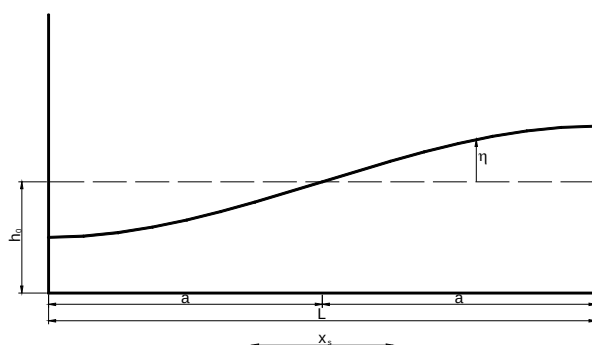


**Figuur 6-4: Algemene opzet van een TLCD**

De optimale demping van de TLCD is hetzelfde als die van de TMD. De TLDC ontleent zijn demping aan turbulentie van de vloeistof en door toepassing van een klep in de horizontale deel van de pijp kan de totale demping verder verbeterd worden. Er is echter geen literatuur met informatie over berekening van de demping van een TLDC bekend, dus moet deze uit proeven op TLDC prototypen worden bepaald.

#### 6.4.3.5 Tuned liquid dampers

Tuned Liquid Dampers (TLDs) zijn passieve dempers die bestaan uit starre containers of tanks die opgevuld zijn met een vloeistof (zie Figuur 6-5). Dit type demper wordt gebruikt om horizontale bewegingen tegen te gaan. Voordelen zoals lage kosten, zeer lage aanzetniveaus, eenvoudige aanpassing van de eigenfrequentie hebben geleid tot een verhoogde interesse voor dit soort dempers. Men moet opletten met de beweging van de vloeistof dat een zeer niet-lineair gedrag kan vertonen bij grote trillingsamplitudes.



**Figuur 6-5: Werking van een TLD**

## 7 Referenties

- [1] HiVoSS (Human induced Vibrations of Steel Structures): Design of Footbridges – Background document, May 2008.