



Kennisdocument geluid van stalen bruggen

16-10-2024

UTSP-959538060-15575

versie - Definitief

Leeswijzer

De afstraling van geluid bij stalen verkeersbruggen kan tot veel hinder leiden in de omgeving. Omdat bruggen een levensduur hebben van tientallen jaren is een lawaaiige brug een groot risico op jarenlange ellende in de omgeving. Een groot deel van die geluidafstraling kan worden voorkomen door in het ontwerp andere keuzes te maken. Denk daarbij aan de afmetingen, gewicht en stijfheid van het rijdek, de oplegging, de locatie van de horizontale liggers, et cetera. Deze belangrijke keuzes moeten in de ontwerpfase gemaakt worden. Het achteraf stiller maken van een lawaaiige brug is veel minder effectief en vaak ook kostbaar. Dit document is belangrijk voor iedereen die te maken heeft met nieuwbouw en renovatie van bruggen en daarmee een geluidprobleem kan voorkomen. Ook biedt dit document handvatten voor diegenen die al te maken hebben met een lawaaiige brug en willen weten wat nog mogelijk is ter verzachting van de omstandigheden voor de omgeving.

In dit kennisdocument over geluid van bruggen wordt het onderwerp in de breedst mogelijk zin behandeld. Het is zo opgebouwd dat, afhankelijk van je rol in de keten, de voor jou belangrijke informatie in een specifiek hoofdstuk te vinden is. Je hoeft het document dus niet van voor naar achter te lezen, hoewel dat meer inzicht kan verschaffen in de materie buiten je eigen werkveld natuurlijk.

Aanbevolen hoofdstukken voor:

- | | |
|----------------------------------|---------------------------------|
| • Opdrachtgevers | twee en drie |
| • Architecten | drie |
| • Ontwerpers en engineers | drie, vier en acht |
| • Projectteams nieuwbouw | twee, drie, vier, vijf en negen |
| • Projectteams renovatie | twee, drie, zes en negen |
| • Beheerders | drie en zeven |

Inhoudsopgave

Leeswijzer	2
1. Inleiding.....	5
1.1. Beoogd toepassingsgebied.....	5
1.2. Aanleiding	5
1.3. Achtergrond	5
1.4. Aanpak	5
1.5. Beknopt overzicht van de inhoud.....	6
2. Geluid(hinder) en wettelijke regels.....	7
2.1. Geluidwetgeving	7
2.2. Geluidberekeningen	7
2.3. Maatwerk richtlijnen en eisen	8
3. Geluid van bruggen	10
3.1. Bruggen en geluid	10
3.2. Brugtypes en risico geluidhinder.....	11
3.3. Ontstaansmechanisme bruggeluid	12
3.4. Type geluid en geluidhinder	14
3.4.1. Impulsgeluid	14
3.4.2. Rolgeluid	15
3.4.3. Laagfrequent karakter van bruggeluid	15
3.5. Invloed locatie en gebruik op hinderrisico	15
3.5.1. Locatie	15
3.5.2. Verkeerssituatie	16
4. Trillingen in de omgeving van de brug.....	18
4.1. Ontstaansmechanisme.....	18
4.2. Risico's van trillingshinder beperken	18
4.3. Trillingshinder of laagfrequent geluid	19
4.4. Richtlijnen	19
4.5. Beoordeling.....	19
5. Nieuwbouw	21
5.1. Voorbereiding en akoestische voetafdruk.....	21
5.1.1. Informatie voor de (ambtelijk) opdrachtgever	21
5.1.2. Informatie voor het projectteam: voorbereiding uitvraag	21
5.1.3. Vuistregels geluidarm ontwerp stalen bruggen	22
5.2. Eisen bij nieuwbouw	23
6. Vervanging en renovatie	25
6.1. Rekening houden met randvoorwaarden bestaande brug.....	25
6.1.1. Informatie voor de (ambtelijk) opdrachtgever	25
6.1.2. Informatie voor het projectteam: werkvoorbereiding	25
6.2. Do's en don'ts bij vervanging of renovatie van het brugval.....	25

6.3.	Quick win's	27
6.3.1.	Verstijven	28
6.3.2.	Perforatie	28
7.	Beheer en onderhoud	29
7.1.	Geluidproblemen voorkomen.....	29
7.2.	Geluidproblemen oplossen.....	29
7.2.1.	Oorzaken onderzoeken	29
7.2.2.	Specialistisch onderzoek naar de oorzaken van hinder.....	30
7.2.3.	Maatregelen	30
7.3.	Specifieke maatregelen voor stalen bruggen.....	31
7.3.1.	Voorkomen van speling	31
7.3.2.	Demping.....	31
7.3.3.	Afschermen	32
7.3.4.	Absorptie.....	32
7.4.	Maatregelkeuze en uitvoering	33
7.4.1.	Proces	33
7.4.2.	Kosten en baten analyse.....	33
7.4.3.	Kwantificeren van het resultaat	33
8.	Toekomstige ontwikkelingen.....	34
8.1.	Toekomstige bouwwijze bruggen en dekken.....	34
8.1.1.	Vernieuwing constructietechniek	34
8.1.2.	Modulaire concepten en hergebruik	35
8.1.3.	Vorm naar functie versus functie naar vorm.....	35
8.2.	Rekening houden met veranderingen in woningbouw	35
8.3.	Innovatieve maatregelen voor geluidproblemen	36
8.4.	Effectbepaling	36
8.4.1.	Modelonderzoek	36
8.4.2.	Metingen	37
9.	Eisen en toetsing	39
9.1.	Het stellen van eisen aan geluid.....	39
9.1.1.	Wat is geregeld vanuit de geluidregelgeving?	39
9.1.2.	Wat kun je regelen in contracteissen?	39
9.2.	Contracteisen	41
9.2.1.	Geluideis voegovergang	41
9.2.2.	Geluideis wegdek	42
9.2.3.	Brugtoeslag.....	43
10.	Literatuur.....	45
11.	Begrippen en afkortingen	46

1. Inleiding

1.1. Beoogd toepassingsgebied

Dit kennisdocument over geluid is een hulpmiddel voor ambtelijke opdrachtgevers, projectteams en assetbeheerders bij de overheid die te maken hebben met nieuwbouw, vervangingen en renovatie en beheer en onderhoud van stalen bruggen.

Het document geeft daarnaast informatie voor constructeurs, architecten en andere marktpartijen die willen weten hoe in het ontwerp rekening gehouden kan worden met geluid.

Het document is hoofdzakelijk geschreven voor de gemeentelijke en provinciale situatie met (beweegbare) stalen verkeersbruggen. De principes die beschreven worden kunnen ook relevant zijn voor bruggen in het hoofdwegennet en voor spoorbruggen en waar het om voegovergangen gaat, ook voor betonnen bruggen.

1.2. Aanleiding

Met de Samenwerkingsagenda geluid werkt de provincie Utrecht samen met haar gemeenten om geluidhinder te beperken. Een van de projecten is om nader te onderzoeken op welke wijze de geluidoverlast vanwege wegverkeer op bruggen beperkt kan worden. De provincie heeft M+P opdracht gegeven om in afstemming met een begeleidingsgroep van belanghebbenden van provincies en gemeenten voorliggend kennisdocument op te stellen.

1.3. Achtergrond

De meeste bruggen in Nederland zijn van beton of van staal. Met name de beweegbare stalen bruggen zijn bekend om de geluidoverlast die kan ontstaan wanneer het verkeer over de brug rijdt. Het ontstaan van hinder bij stalen bruggen is gerelateerd aan het typische karakter van het bruggeluid [14]. Hinder kan ook gedurende het gebruik ontstaan door slijtage van de brug en/of door veranderingen in het gebruik. Behalve het geluid dat de brug afstraalt is er ook het geluid van de waarschuwingsinstallatie als een brug geopend wordt. Het zeer regelmatig optredende bellen kan ook als heel hinderlijk worden ervaren. Dit kennisdocument richt zich niet op die bron van hinder, maar op de geluidhinder vanwege geluidafstraling van de brug zelf.

Bij nieuwbouw- of vervanging en renovatie (VenR) projecten van stalen bruggen ontstaan steeds vaker klachten over geluidhinder nadat de nieuwe brug (weer) is opengesteld voor verkeer [10]. Geluid lijkt daarmee een onderbelicht thema in het huidige aanbestedings-, ontwerp- en bouwproces [13].

Vaak zijn de eisen aan geluid te zacht en er is geen strikt wettelijk kader (zie hoofdstuk o) waarmee een stille brug kan worden afgedwongen. Het ontbreken van duidelijke kaders is een probleem.

Bij stalen bruggen waar (mogelijk) geluidhinder kan optreden is het daarom relevant om de geluidemissie als primair omgevingseffect op te nemen en dit kwantitatief te borgen in het programma van eisen.

1.4. Aanpak

Dit kennisdocument is gebaseerd op literatuur, ervaring en input van een begeleidingsgroep én mensen die vanuit verschillende rollen te maken hebben met bruggen. Uit deze interviews en praktijkvoorbeelden komt naar voren dat 'geluid' gaandeweg het proces, van voorbereiding tot oplevering, nogal eens buiten beeld raakt. Dit leidt onbedoeld tot lawaaiige bruggen die niet alleen hinder veroorzaken maar waaraan vaak achteraf nauwelijks nog maatregelen te treffen zijn.

Met behulp van beschikbare kennis en ervaring worden in dit document aanknopingspunten gegeven die aansluiten bij de behoeften die in de gesprekken met betrokkenen naar voren kwamen.

1.5. Beknopt overzicht van de inhoud

Het document is thematisch opgebouwd. Elk hoofdstuk start met het beschrijven van de hoofdlijnen en gaat vervolgens meer de diepte in.

Hoofdstuk 2

- Wettelijk kader
 - Omgevingseffecten geluidhinder, gezondheid in het licht van wet- en regelgeving

Hoofdstuk 3

- Introductie geluid van bruggen en oorzaken hinderbeleving
 - Het ontstaansmechanisme van geluid
 - Risicobepaling geluid in projecten

Hoofdstuk 4

- Trillingshinder rond bruggen

Hoofdstuk 5

- Nieuwbouw
 - Relevantie van geluid in de eerste fase van het proces
 - Beschrijving van gunstige en ongunstige ontwerpaspecten, do's & don'ts waarmee in het ontwerptraject het verschil kan worden gemaakt

Hoofdstuk 6

- Vervanging en renovatie
 - Relevantie van geluid in de eerste fase van het proces
 - Beschrijft do's & don'ts, quick wins en verbetermogelijkheden

Hoofdstuk 7

- Beheer en onderhoud
 - Waar moet je op letten om een brug stil te houden, welke bekende maatregelen zijn effectief om geluidhinder in een bestaande situatie aan te pakken

Hoofdstuk 8

- Toekomstige technieken
 - Geluidmaatregelen
 - Maatregelonderzoek
 - Alternatieve bouwwijzen

Hoofdstuk 9

- Eisen en toetsing
 - Kwantitatieve geluideisen bij nieuwbouw en VenR
 - Meten en beoordelen van het bruggeluid aan de hand van het meetprotocol

2. Geluid(hinder) en wettelijke regels

2.1. Geluidwetgeving

De Nederlandse geluidwetgeving biedt burgers bescherming tegen wegverkeersgeluid. Voor geluidgevoelige bestemmingen, zoals woningen, is vastgelegd wat de maximaal toelaatbare geluidbelasting is. Deze geluidbelastingen worden niet gemeten, maar via een voorgeschreven rekenmethode bepaald. In de berekeningen wordt rekening gehouden met de intensiteit en samenstelling van het verkeer, de gemiddelde voertuigsnelheid, het wegdek en relevante omgevingsobjecten in verband met reflectie, absorptie en afscherming. De geluidbelasting betreft een gemiddelde over een langere periode (bijvoorbeeld een etmaalwaarde die iets zegt over het gehele etmaal of een gemiddelde over het gehele jaar (*Lden*). In de geluidbelasting die aan de normen getoetst wordt, wordt voor het geluid in de avond- en nachtperiode een toeslag toegepast van resp. 5 en 10 dB.

Rond het onderwerp 'geluid van bruggen' vragen een paar thema's om extra toelichting. Die hebben te maken met het specifieke karakter van het geluid van bruggen en de manier waarop in de geluidregelgeving daaraan aandacht wordt gegeven en met de overgang naar de Omgevingswet.

In de volgende hoofdstukken wordt dieper ingegaan op het karakter van het geluid van de brug. In relatie met de regelgeving is het van belang om te realiseren dat de regelgeving gebaseerd is op het gemiddelde geluid over een relatief lange periode. Dat betekent dat die geen aandacht geeft aan opvallende piekgeluiden, bijvoorbeeld het geluid van de voegovergang of andere opvallende stootgeluiden. Deze bronnen kunnen voor de hinderbeleving heel relevant zijn, maar in de geluidregelgeving zijn ze niet genormeerd. Daarnaast geldt dat de geluidbelastingen die genormeerd zijn in de regelgeving, gebaseerd zijn op het totale geluid van de weg dat op de woning berekend wordt. Dat betekent dat de eventuele afwijkende emissie van de brug als bron (een bron met meer geluid voor de lengte van de brug ten opzichte van het geluid van de weg voor en na de brug) op grotere afstand van de brug maar beperkt meeweegt.

Wat betreft de overgang naar de Omgevingswet geldt dat de instrumenten voor rijkswegen min of meer gelijk blijven, maar dat de instrumenten voor gemeentelijk wegen en voor provinciale wegen sterk veranderen. Met instrumenten bedoelen we bepaalde verplichtingen die er zijn om uitvoering te geven aan de bescherming tegen geluid. Zo krijgen zowel gemeentelijke wegen als provinciale wegen een systeem dat moet voorkomen dat het geluid in de omgeving door de jaren heen (onbeheerst) kan toenemen. Voor gemeentelijke wegen is dat het BGE-instrument (basisgeluidemissie). Voor provinciale wegen is dat het instrument van geluidproductieplafonds (GPP's) zoals we dat al sinds 2012 kennen voor rijkswegen en hoofdspoorwegen. Vanuit overgangsrecht zullen in de komende jaren oude systematiek (Wet geluidhinder, Wet milieubeheer) en nieuwe regelgeving (Omgevingswet) naast elkaar gebruikt worden. Tussen de rekenmethoden zitten (kleine) verschillen, bijvoorbeeld als het gaat om de verplichting het extra geluid dat een brug maakt (bijvoorbeeld van de hele constructie en vanwege een voor geluid ongunstiger deklaag) mee te nemen.

2.2. Geluidberekeningen

De geluidberekeningen moeten uitgevoerd worden volgens de rekenmethoden zoals die horen bij de wetgeving die voor het project van toepassing is. In grote lijnen betekent dat voor:

- de Wet geluidhinder en de Wet milieubeheer: het Reken- en meetvoorschrift 2012 (Rmg2012), de rekenmethode voor wegen is opgenomen in Bijlage III;

- de Omgevingswet: de Omgevingsregeling (Or), de rekenmethode voor wegen is opgenomen in Bijlage IVe (Meet- en rekenmethode geluid wegen).

In het Rmg2012 wordt geen rekening gehouden met de verhoogde geluidemissie die de voegovergang en/of de brug zelf kan veroorzaken. De achtergrond daarvan is dat de hinder bij bruggen zich manifesteert via pulsachtig geluid dat zich slecht laat vertalen in het systeem van de rekenmethode waar gemiddelde waarden worden beoordeeld. Dat betekent bij wegverkeer dat in het voortraject doorgaans niet wordt getoetst of de aanleg van een voegovergang of brug leidt tot te veel geluid in de omgeving, terwijl hier wel sprake kan zijn van extra geluidhinder. Het Rmg2012 biedt wel de mogelijkheid om voor situaties die buiten het toepassingsbereik van de rekenmethode vallen nader onderzoek te doen. Daar is in de praktijk in een aantal situaties met klachten rond een lawaaiige brug gebruik gemaakt.

In de Omgevingsregeling is er voor voegovergangen (dus het piekgeluid) niets gewijzigd. Wat wel veranderd is, dat in de rekenmethode expliciet aangegeven is dat als de brug zelf meer geluid maakt, dat dan dat geluid in de vorm van een toeslag in de berekeningen meegenomen moet worden. De letterlijke tekst van paragraaf 2.4.4 (bijlage IVe Or) is: *Bij stalen kunstwerken, waarbij redelijkerwijs een verhoogde emissie verwacht wordt, wordt de toename van de emissie ten gevolge van de invloed van het kunstwerk in rekening gebracht met een geluidemissietoeslag. Voor de hoogte van deze toeslag is nader onderzoek noodzakelijk.*

De toelichting op de Omgevingsregeling biedt geen extra achtergrondinformatie of instructie over hoe je dit zou kunnen doen. Het is een onderwerp van 'nader onderzoek', dat betekent dat in de uitvoering zelf een eigen (valide) aanpak gekozen kan worden. De indruk is dat deze instructie vanuit de Omgevingsregeling in de praktijk (nog) niet gebruikt wordt. Ook op het rijkswegennet zijn er bruggen waar sprake is van 'verhoogde emissie'. Rijkswaterstaat werkt aan de herziening van een meet- en rekenmethode om invulling te geven aan het stukje nader onderzoek dat vanuit de Omgevingsregeling gevraagd wordt. Deze aanpak wordt ook genoemd in de handreiking van Rijkswaterstaat voor geluidonderzoek voor rijkswegen, het Kader Akoestisch Onderzoek Wegverkeer (KAOW, [16] en [17]).

Het vraagt van de wegbeheerder voor dergelijke bruggen met verhoogde geluidemissie ook om informatie te verzamelen en via de Centrale Voorziening Geluidgegevens (CVGG) beschikbaar te stellen en te gebruiken voor bijvoorbeeld het bepalen van het BGE (gemeentelijke wegen) en de GPP's (provinciale wegen en rijkswegen). Overigens is een dergelijke manier van werken voor railverkeersgeluid al veel langer in gebruik (Or, bijlage IVf, paragraaf 4.2). Het voorschrift voor spoorwegen bevat een methode om de verhoogde brugemissie te meten en mee te nemen in de berekeningen. De eigenschappen van de brug worden als brongegevens beschikbaar gesteld via het CVGG.

2.3. Maatwerk richtlijnen en eisen

Het is uiteraard voor een opdrachtgever niet wenselijk dat een geluidssituatie die op papier "in orde" lijkt, alsnog tot een stroom van klachten leidt vanuit de omgeving. Hoewel de geluidwetgeving in zo'n situatie niet per se aanleiding zou geven voor geluidmaatregelen, bestaat er ook zoiets als de zorgplicht tot een goede ruimtelijke ordening en een evenwichtige toedeling van functies aan locaties.

Dat betekent dat lokaal door beheerders (bevoegd gezag) aanvullend eisen gesteld kunnen worden aan onderdelen van de weg, in dit geval de brug en de voegovergangen. Daarvan zijn voorbeelden in de vorm van richtlijnen en eisen die in de contractvorming bij aanleg en onderhoud een rol spelen.

Sinds 2006 bestaat er een richtlijn hoe om te gaan met geluid van voegovergangen en een methode om om te gaan met de hinder van laagfrequent geluid. De richtlijn rond voegovergangen is opgesteld op initiatief van Rijkswaterstaat maar is inmiddels uitgebreid zodat deze ook voor provinciale en gemeentelijke wegen toepasbaar is. De meest actuele versie van deze richtlijn, de RTD 1007-3 [2], is vrij beschikbaar via het platform voegovergangen en opleggingen (PVO). Met deze richtlijn kan vooraf getoetst welke oplossing met een voegovergang vanuit geluidoogpunt acceptabel is en hoe een situatie geluidtechnisch kan worden beoordeeld.

De richtlijn voor geluid van voegovergangen is toepasbaar voor elke overspanning van een weg waar de bewegingen van het rijdek door voegovergangen worden opgevangen. Het aandacht geven aan het geluid van voegovergangen is echter niet toereikend voor de geluidhinder van stalen bruggen. De emissie van laagfrequent geluid heeft ook te maken met allerlei andere bronnen van de brug. De combinatie van gewicht, afmetingen en stijfheid zorgen voor een effectievere afstraling van geluid. Voor stalen bruggen is daarom op initiatief van de provincie Noord Holland een beoordelingsprotocol [5] opgesteld in 2016. Hierin staat beschreven hoe geluideisen gesteld kunnen worden aan stalen bruggen en hoe deze via metingen gecontroleerd kunnen worden.

Voor de praktische uitwerking van dergelijke eisen, zie hoofdstuk 9.

3. Geluid van bruggen

3.1. Bruggen en geluid

Bruggen leggen de verbinding tussen twee oevers van het water. In waterrijke gebieden kunnen bruggen vaak geopend worden om de scheepvaart door te laten. Als de doorvaarthoogte groter is of weinig scheepvaart wordt verwacht, dan zijn de bruggen doorgaans 'vast' in plaats van 'beweegbaar'. Vaste bruggen zijn vaker van beton terwijl beweegbare bruggen eerder grotendeels van staal zijn (zie figuur 1).

Kunstwerken die gebruikt worden bij een ongelijkvloerse kruising van wegen zijn vaste bruggen en doorgaans geheel van beton. Bij deze viaducten speelt 'geluid' alleen rond de keuze van de voegovergang. Geluideisen aan voegovergangen zijn beschreven in de RTD1007-3 [2].



figuur 1 *Beweegbare stalen bruggen in verschillende uitvoeringsvarianten*

Juist de beweegbare stalen bruggen over het water liggen vaak in een bebouwde omgeving (zie figuur 2). Het brugdek en het val worden door het verkeer in beweging gebracht, hierbij ontstaan trillingen die, zeker bij ongedempte stalen dekken, kunnen leiden tot geluidafstraling van de brug.

Er zijn drie belangrijke redenen waarom brug geluid over het algemeen goed afstraalt naar de omgeving:

- Het laagfrequente karakter van het geluid,
 - De lagere geluid frequenties, de 'bas tonen', dragen verder dan hogere tonen. Stalen bruggen stralen vaak veel geluid af in het lage frequentiegebied.
- Afstraling enkele meters boven het maaiveld,
 - Een geluidbron, zoals de onderkant van de brug, die wat hoger ligt ten opzichte van het maaiveld is over het algemeen op grotere afstand hoorbaar dan dezelfde bron op de grond.
- Harde oppervlakken in de omgeving, te beginnen bij het wateroppervlak, maar ook landhoofden in combinatie met onderkant van de brug zorgen voor meer reflecties. Deze tunnelresonantie zorgt voor versterking van het geluid. Laagfrequent geluid verspreidt zich in alle richtingen vanaf de onderkant van de brug.

Het geluid van een stalen verkeersbrug¹ is doorgaans door omwonenden omschreven als:

- gebonk
- onweersgeluid
- laagfrequent geluid
- trillingen in huis



figuur 2 *Typische voorbeelden van (hinder)situaties met een bestaande beweegbare stalen brug (links) en een vaste stalen brug net na renovatie (rechts) in een bebouwde omgeving*

Klachten gaan vaak over geluid dat ontstaat wanneer vrachtauto's over de brug rijden maar kunnen ook gaan over het dichtklappen van het val of het geluid van de alarmbellen na een brugopening.

Veel voorkomende oorzaken van de hinder die genoemd worden door omwonenden zijn:

- slechte staat en problemen met voegen en opleggingen
- wijzigingen aan de brug
- uitgevoerd onderhoud
- te hard rijdende vrachtauto's in de vroege ochtend
- drukker worden van het verkeer

3.2. Brugtypes en risico geluidhinder

In de vorige paragraaf is ingegaan op verschillende soorten bruggen en toepassingsgebieden. Bruggen kunnen ook civieltechnisch ingedeeld worden. In het verleden zijn veel verschillende brugconcepten gebouwd. Veel voorkomende bestaande beweegbare en vaste (gedeeltelijk) stalen verkeersbruggen zijn:

- Ophaalbrug (met hameitoren en balans boven de weg)
- Basculebrug (balans in de kelder onder de weg)
- Tuibrug
- Vaste brug met tussensteunpunten

¹ We maken onderscheid tussen wegverkeersbruggen en spoorbruggen. Bij deze laatste is de aard van de klachten wisselend en worden deze als 'tonaal' of 'rammelend' omschreven. De doelgroep van dit kennisdocument zal voornamelijk bezig zijn met wegverkeersbruggen.

Minder vaak voorkomende types²:

- Draaibrug
- Hefbrug
- Vakwerkbrug
- Boogbrug

De mate waarin een brug in trilling wordt gebracht en de mate van geluidafstraling kan voor de brugtypes sterk variëren. Zonder in detail in te gaan op de constructie van allerlei brugtypen, kunnen in het algemeen de volgende vuistregels gegeven worden als het gaat om de eigenschappen van een brug en het risico op geluidhinder.

- Volledig stalen brugdekken komen makkelijker in trilling en stralen meer geluid af.
- Brugdekken met een lager gewicht leiden ook vaker tot geluidhinder (val beweegbare brug).
- Een groter netto staaloppervlak betekent een groter risico ten aanzien van geluid.
- Bruggen met voegovergangen haaks op de rijrichting vormen een groter risico.
- Bruggen met een 'grove' slijtlaag als wegdek hebben meer risico.
- Bruggen waar verstijvers of troggen zichtbaar zijn hebben een groter risico.
- Slanke ontwerpen hebben een verhoogd risico op meer geluid.

Nieuwe beweegbare bruggen zijn bijna altijd basculebruggen en in mindere mate ophaalbruggen. Deze hebben een volledig stalen val met een orthotroop rijdek (zie o). Deze brugtypes zijn in de basis een risico voor het ontstaan van geluidhinder.



figuur 3 *Orthotroop brugdek opgebouwd uit twee hoofdliggers, dwarsdragers en aan het dek gelaste troggen*
Ontstaansmechanisme bruggeluid

3.3. **Ontstaansmechanisme bruggeluid**

Het geluid van een brug wordt wel eens omschreven als 'getrommel'. De analogie met een trommel is niet eens zo gek. Het verkeer stoot de brug aan en de energie wordt opgenomen en de trillingen die

² Bij spoorbruggen is de verdeling anders en komen bij korte overspanningen plaatliggerbruggen relatief vaak voor.

ontstaan worden doorgegeven aan het hele object. Een stalen brug heeft grote oppervlakken die niet gedempt zijn, gemakkelijk trillen en effectief geluid afstralen. In de ruimte onder de brug tussen water en landhoofden kan het geluid resoneren en daardoor in de omgeving goed te horen zijn.



figuur 4 Brug en trommel hebben akoestisch overeenkomsten

Om het ontstaansmechanisme van geluid van een brug te beschrijven met een vereenvoudigd model ³, zie figuur 5. Te zien is dat er sprake is van een *keten van gebeurtenissen en brug eigenschappen* die samen leiden tot geluidafstraling.



figuur 5 Vereenvoudigde beschrijving van het ontstaansmechanisme van geluid van een brug bestaand uit een keten van gebeurtenissen en brugeigenschappen

De *gebeurtenis* in het model is de aanstoting tijdens het gebruik van de brug:

- **Aanstoting**
 - Dynamische belasting brugdek
 - Aanstoting bij de voegovergang
 - Band-wegdek interactie van het verkeer wat rijdt over het brugdek (rolgeluid band-wegdek of wiel-rail)
 - Door speling in de oplegging van een beweegbare brug (impulsgeluid)

Eigenschappen die bepalen wat er na de aanstoting gebeurt, zijn:

- **Ingangsimpedantie;**
 - Een maat voor de hoeveelheid energie die op de locatie van de aanstoting opgenomen wordt door de brug (bewegingssnelheid bij een bepaalde kracht)
- **Trillingsoverdracht;**

³ Voor railverkeersbruggen zijn in het verleden geavanceerde rekenmodellen opgesteld. (zie [4]). Bedacht moet worden dat voor de railsituatie minder variabelen in het 'verkeer' aanwezig zijn.

- Het verspreiden van bewegingen door het hele dek (materiaal- en ontwerpeigenschap van de samenstelling van de onderdelen van het brugdek)
- **Afstraalefficiëntie**
 - Zegt iets over in welke mate trillende oppervlakken in staat zijn geluid te produceren (omzetting van trilling in vaste delen naar trilling in de lucht)

Hoorbaar geluid is het *resultaat* van de gebeurtenis en bruceigenschappen:

- **Geluid naar de omgeving**
 - Hoorbaar geluid dat geproduceerd wordt door efficiënt afstralende onderdelen van de brug
 - Mogelijk versterkt door de resonanties in de 'tunnel' onder de brug

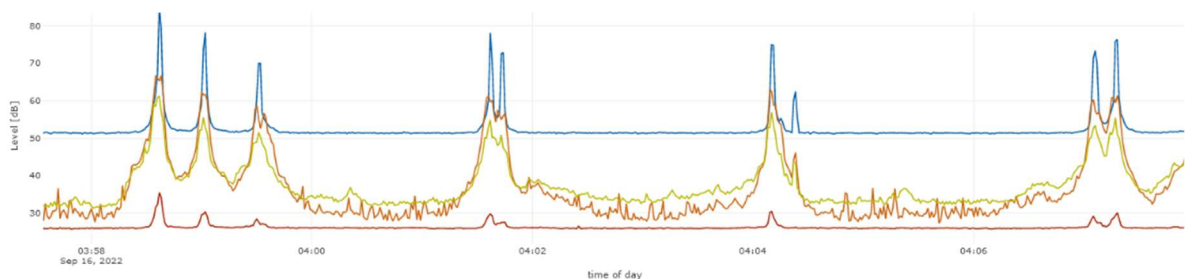
3.4. Type geluid en geluidhinder

3.4.1. Impulsgeluid

Impulsgeluid wordt gekenmerkt door een plotselinge toename van het geluid dat opvallend is ten opzichte van de normale variatie in het geluid van voertuigen op de weg. Voorbeelden zijn het dichtslaan van een deur, een hei-installatie maar ook een auto die over een voegovergang van een brug rijdt.

De hinderervaring van 'impulsgeluid' is niet alleen gerelateerd aan de hoogte van het geluidniveau, maar vooral ook door het verschil met het 'gewone' geluid en de variatie in het geluidniveau. Mensen zijn over het algemeen gevoeliger voor hoorbare verschillen en het karakter van het geluid dat ontstaat bij af en toe voorbijkomende voertuigen dan voor continu aanwezige geluiden.

In figuur 6 is een voorbeeld van een opname weergegeven, waarbij het geluidniveau op verschillende locaties rond de brug en in het huis is uitgezet tegen de tijd. De pieken in het signaal geven (van links naar rechts) de passages van 3 personenauto's en de passages van 3 vrachtauto's weer. De vrachtwagens zijn herkenbaar uit de dubbele piek kort na elkaar, de aanstoting van eerst het trekkend voertuig en daarna de assen van de trailer. In rood is de beperkte maar door bewoners aangemerkt als hinderlijke, toename van geluidsniveaus binnenshuis te zien die gerelateerd kan worden aan het impulsgeluid van de brug.



figuur 6

Voorbeeld van gemeten geluidsignalen van eerst 3 personenauto's en daarna 2 vrachtwagens over een brug gedurende circa 8 minuten. (blauw: direct onder de brug, geel en oranje: op 40 en 65 meter afstand van de brug, rood: in een woning)

3.4.2. Rolgeluid

Rolgeluid ontstaat op wegdekken primair doordat de ondergrond de banden in trilling brengen. De banden stralen vervolgens geluid af naar de omgeving. Band-wegdek geluid wordt vaak gereduceerd met stille wegdekken. Dit zijn wegdekken met een lagere oppervlaktetextuur en holle ruimte in de toplaag van het asfalt waardoor geluid wordt geabsorbeerd. Het is technisch niet mogelijk om op beweegbare stalen brugdekken een reguliere asfalt deklaag toe te passen.

Op stalen brugdekken wordt daarom meestal een stroeve slijtlaag gebruikt. Dit type wegdek heeft een relatief grove textuur en is niet geluidabsorberend. Tijdens het overrijden wordt niet alleen de band van het voertuig maar ook door rolexcitatie het stalen brugdek in trilling gebracht. Het verschil tussen het rolgeluid over het (stille) asfalt voor en na de brug en het brugdek is vaak goed hoorbaar doordat op de brug het niveau toeneemt en het karakter van het geluid van midden- naar laagfrequent verschuift.

3.4.3. Laagfrequent karakter van bruggeluid

Een stalen brug straalt vanwege de vorm en afmetingen vaak extra lage tonen af. Dit laagfrequente geluid heeft wat minder last van luchtdemping en draagt daardoor verder dan hoogfrequent geluid. Ook is laagfrequent geluid door de grotere golflengte minder gevoelig voor afschermende constructies waardoor het gemakkelijk in de omgeving uitbreidt.

Gebouwen hebben een zekere geluidisolatie waarbij geluid door de gevel (muur of dak inclusief ramen en deuren) wordt tegengehouden. Deze gevelisolatie werkt typisch bij lage frequenties minder goed. Binnenshuis blijft het laagfrequente geluid hoorbaar terwijl het overige geluid door de gevel wordt gedempt.

Deze optelsom van intermitterend laagfrequente geluidafstraling, gemakkelijke verspreiding in de omgeving en beperkte gevelisolatie zorgt ervoor dat de klachten omschreven worden als 'onweersgeluid in huis'.

3.5. Invloed locatie en gebruik op hinderrisico

3.5.1. Locatie

Met bij name woningen in de directe omgeving van een brug is de hinderbeleving vanwege het bruggeluid sterker. Oudere woningen op korte afstand zijn extra gevoelig doordat de eerste verdieping vaak op gelijke hoogte ligt als de brug en het dak vaak een lichte constructie zonder (geluid)isolatie betreft. In dergelijke huizen is het geluid in de slaapkamers zeer goed hoorbaar.

Afhankelijk van de hoogteligging van de brug, de geluidniveaus en de reflecties via het water kan het geluid van de brug en daarmee de hinder ook op grotere afstand relevant zijn. Over het algemeen geldt dat bij een directe zichtlijn over het water naar de brug, deze ook goed hoorbaar is. Er zijn situaties bekend waar mensen op anderhalve kilometer afstand hinder ondervinden.

Het onregelmatig passeren van voertuigen over de brug (aanstoting bij de voegovergang) en het laagfrequente karakter van het geluid levert in een stille omgeving ook op grotere afstand duidelijk hoorbaar geluid en hinder op. Dat speelt minder in een drukker omgeving met veel maskerend geluid.



Risico: Woningen dichtbij de brug

- Geluid breidt makkelijk uit, bron vaak hoog en waterreflecteert
- Laagfrequent discon nu geluid: horen = hinder

figuur 7

Risicovolle situering ten aanzien van te verwachten geluidhinder (foto: M+P)

3.5.2. Verkeerssituatie

Doordat juist het kortdurende aanstootgeluid als hinderlijk kan worden ervaren, is één vrachtauto al hoorbaar. Ook op locaties met een lage verkeersintensiteit kunnen daardoor de af en toe passerende vrachtauto's voor hinder zorgen.

Rijsnelheid en voertuiggewicht hebben direct invloed op het afgestraalde geluidniveau. Bij gewichtstoename en een hogere rijsnelheid is het geluidniveau hoger. Bruggen in provinciale wegen met een hoge verkeersintensiteit, veel zwaar verkeer en een (te) hoge rijsnelheid vormen daarom een groter risico dan rustige locaties met een lage verkeerssnelheid.

Doorstroomwegen waar in de vroege ochtend stevig wordt doorgereden met zware vrachtauto's zijn berucht om de geluidoverlast van de brug.



figuur 8

Meest voorkomende geluidproblemen bij stalen verkeersbruggen (foto: M+P)

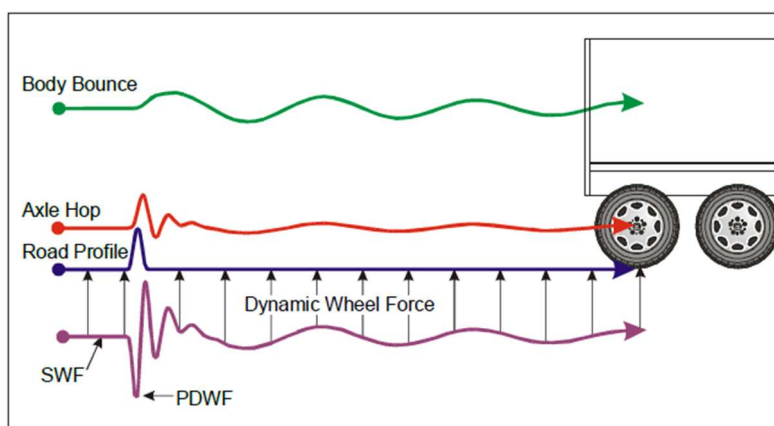
4. Trillingen in de omgeving van de brug

4.1. Ontstaansmechanisme

Voertuigen die over oneffenheden rijden veroorzaken extra trillingen. Trillingen die ontstaan bij de overgang van aarden baan naar aanbrug, landhoofd, pijlers en voegovergangen kunnen via de fundering van de constructie worden doorgegeven aan de bodem en zich zo verspreiden in de omgeving.

Voorals de overgang naar het stalen val heeft impact op de trillingen in het brugdek. Deze dynamische aanstoting van het stalen dek resulteert met name in geluid maar zorgt ook voor trillingen in de bodem. Bij wegverkeer speelt het fenomeen met name bij zware voertuigen zoals bussen en vrachtauto's. De impact is afhankelijk van de rijnsnelheid en van de aslast van het voertuig: hogere aslast en/of hogere snelheid betekent meer impact van trillingen.

In figuur 9 is te zien dat door een oneffenheid in de weg (bij bruggen de voegovergang) het voertuig in trilling wordt gebracht en als het ware verder over het brugdek stuitert, waardoor de krachten tussen de brug en het voertuig sterk variëren en de hele constructie gaat trillen. Behalve vanwege een voegovergang speelt dit mechanisme ook bij oneffenheden (onvlakheid) in het brugdek zelf, of door variatie van de stijfheid van het dek in de lengterichting. In de praktijk kan het een complex samenspel zijn van mechanismen die zorgen voor trillingen naar de omgeving.



figuur 9

Schematische weergave van de dynamische krachten op een brugdek na het overrijden van een oneffenheid (bron: [11] met SWF= static wheel force en PDWF=peak dynamic wheel force)

4.2. Risico's van trillingshinder beperken

Bij de ontwerpkeuze van een relatief lichtgewicht bovenbouw zal het aspect trillingen belangrijker zijn dan bij zwaardere constructies. Trillingen worden in een lichte constructies minder goed gedempt dan in een zwaardere. Bij vervanging van een bestaand zwaar brugdek naar een lichter dek, kan de doorgifte van trillingen aan de onderbouw veranderen. Mogelijk zorgt dat in bepaalde situaties voor trillingshinder in de omgeving.

Het is daarom aan te bevelen om in zo'n situatie de lokale condities te onderzoeken en na te gaan of trillingen een extra risico vormen voor het (aangepaste) brugontwerp. Belangrijke factoren voor de overdracht zijn de bodemgesteldheid en de afstand tot de woningen.

Als uit het vooronderzoek blijkt dat er een risico is op trillingshinder, dan is het aan te bevelen om eisen te stellen aan de trillingsniveaus.

4.3. Trillingshinder of laagfrequent geluid

Omwonenden omschrijven de hinder van een brug af en toe als 'trillingshinder'. In de praktijk is het niet altijd duidelijk of de hinder gebaseerd is op trillingen of op laagfrequent geluid. Vanuit trillingsmetingen bij stalen bruggen in de woning van gehinderden blijkt regelmatig dat de niveaus van de trillingen erg laag zijn en soms nauwelijks kunnen worden gemeten. Mogelijk dat bewoners laagfrequent geluid ervaren als bodemtrillingen. Daarnaast kan het voorkomen dat trillingen vanuit de bodem worden doorgeven aan vloeren of wanden van de woning die vervolgens laagfrequent geluid afstralen.

In een aantal gevallen zijn wel trillingen in een woning gemeten die gerelateerd konden worden aan passages van zware vrachtauto's over de brug. In een beperkt aantal gevallen werd de streefwaarde voor de trillingsterkte overschreden.

4.4. Richtlijnen

Voor trillingshinder gelden geen grenswaarden die vastgelegd zijn in (harde) wettelijke normen. Er zijn wel richtlijnen in gebruik (zie ook de zorgplicht, paragraaf 2.3). Er kan een prestatie-eis worden gebruikt die verwijst naar de volgende drie richtlijnen:

- SBR Trillingsrichtlijn A, Schade aan bouwwerken, november 2017;
- SBR deel B, Hinder voor personen in gebouwen, meet- en beoordelingsrichtlijn, augustus 2002;
- SBR deel C, Storing aan apparatuur, meet- en beoordelingsrichtlijn, augustus 2002;

De richtlijn deel A heeft vooral betrekking op de bouwfase en gaat om hoge trillingsniveaus. Dergelijke trillingsniveaus komen niet voor ten gevolge van passerend wegverkeer. De richtlijn deel C heeft betrekking op de meetmethodiek in verband met apparatuur en is hier niet relevant.

Voor de gebruiksfase van de brug, het optreden van trillingen tijdens verkeerspassages, is SBR richtlijn B "Hinder voor personen in gebouwen" [6] relevant. Hierin zijn streefwaarden voor hinder voor de verschillende gebouwfuncties opgenomen.

4.5. Beoordeling

Voor het beoordelen van de trillingen is de functie van het gebouw of de ruimte in het gebouw en het type trillingen van belang. De trillingen worden beoordeeld op het frequentiegebied van 1 tot en met 80 Hz. De streefwaarden worden uitgedrukt in een gewogen trillingssnelheid. Door middel van integratie wordt het gemeten signaal omgezet in een voortschrijdende effectieve waarde. In de onderstaande tabel zijn de streefwaarden voor deze gewogen trillingssnelheden $V_{\text{eff,max}}$ weergegeven, deze waarde is dimensieloos.

In tabel I zijn de streefwaarden uit de SBR richtlijn deel B overgenomen.

tabel I

Streefwaarden voor herhaald voorkomende trillingen voor woningen in bestaande situaties

	dag en avond	nacht
A1. maximale trillingssterkte, $v_{\max}$ [.] in de beoordelingsperiode	0,2	0,2
A2. Hoogst toelaatbare maximale trillingssterkte, $v_{\max}$ [.]	0,8	0,4
A3. Gemiddelde trillingssterkte over beoordelingsperiode, v_{per} [.]	0,05	0,05

Trillingen dienen nader beschouwd te worden indien streefwaarde A1 op enigerlei moment tijdens de metingen overschreden wordt. Trillingssterktes tot aan streefwaarde A2 zijn toelaatbaar mits de trillingssterkte voor de periode A3 niet overschreden wordt. Trillingen sterker dan de streefwaarde van A2 zijn niet toelaatbaar.

Bijlage 5 van de SBR richtlijn B geeft een kwalificatie voor de optredende trillingssterkte. Deze kwalificatie is opgenomen in tabel II.

tabel II

Hinderkwalificatie voor weg- en railverkeer

$V_{\text{eff,max}}$ [-]	hinderkwalificatie
< 0,1	geen hinder
0,1 - 0,2	weinig hinder
0,2 - 0,8	matige hinder
0,8 - 3,2	hinder
> 3,2	ernstige hinder

Voor bestaande woningen stelt de SBR richtlijn dat moet worden gestreefd naar 'weinig hinder' maar dat 'matige hinder' incidenteel geoorloofd is.

5. Nieuwbouw

5.1. Voorbereiding en akoestische voetafdruk

5.1.1. **Informatie voor de (ambtelijk) opdrachtgever**

Het geluid dat een brug maakt hangt zo sterk samen met het ontwerp dat er achteraf vaak ingrijpende aanpassingen nodig zijn om geluidproblemen op te lossen. Als deze maatregelen al mogelijk zijn. Bij een bestaande brug is dat misschien het overwegen waard, hoewel aanpassingen vanwege gewichtsbependingen maar beperkt mogelijk zijn. Bij een nieuwe brug is het doen van ingrijpende aanpassingen na realisatie vanzelfsprekend niet wenselijk. Bij nieuwbouw meegenomen maatregelen zijn daardoor effectiever dan maatregelen die achteraf worden genomen.

De grootste uitdaging bij het ontwerpen en bouwen van een stille brug ligt niet bij de techniek, maar in het integrale ontwerpproces. Het is belangrijk om vanaf het begin van het proces geluid mee te nemen als randvoorwaarde én deze voorwaarde te blijven bewaken in de processtappen voor én na de aanbesteding. Daarnaast moet het belang van een stille brug afgewogen worden tegen de mogelijk extra kosten en een lagere score van de milieukostenindicator (MKI) door extra materiaalgebruik. Het is een aanbeveling om gedurende het gehele proces van opdracht, ontwerp tot realisatie (incl. bouw hinder) en eventuele monitoring een deskundige met expertise van bruggeluid (en trillingen) in het projectteam te betrekken.

Ook technisch gezien zijn er uitdagingen rond het toepassen van innovaties en maatregelen. Soms is de innovatie nog niet uitontwikkeld, of is de effectiviteit van de maatregel nog beperkt onderbouwd of zijn de inzichten in kosten en beheer- en onderhoud nog bescheiden.

Hoofdstuk 3 van dit document geeft aan de hand van de karakteristiek van een brug handvatten om te bepalen of er geluidhinder te verwachten is en of een stille brug wenselijk is. De paragraaf over het ontstaansmechanisme van bruggeluid helpt om de juiste ontwerpkeuzes te maken.

5.1.2. **Informatie voor het projectteam: voorbereiding uitvraag**

Het projectteam dat aan de slag gaat met de voorbereiding van de aanbesteding voor de bouw van een nieuwe brug doet er goed aan om in de eerste fase naast de standaard omgevingsaspecten ondanks het gebrek aan wettelijk kader, ook geluid en mogelijke geluidhinder te beschouwen.

Is de locatie dichtbij woningen? Zijn er al klachten over geluidhinder? Wordt er een brug gebouwd op een plek waar nog geen brug was? Is het een nieuwe brug op een iets andere locatie waardoor de

Praktijkervaringen van constructeurs

"Een prijswinnend architectonisch brugontwerp is in de uitwerking vaak niet gemakkelijk stil uit te voeren"

"Bestaande hoogteligging en eisen aan doorvaartheogte of het ontwerp van rijstrookindeling vragen om een brugontwerp dat niet stil uit te voeren is"

"Een goede MKI score op materiaalgebruik zit een stil ontwerp in de weg"

afstand tot de woningen verandert? Deze informatie kan helpen om te bepalen of in het ontwerp van de nieuwe brug rekening gehouden moet worden met geluid en mogelijk met trillingen.

Als een geluidarme brug nodig is, dan is het zaak om dit vast te leggen in het programma van eisen. De eisen moeten voldoende kwantitatief en toetsbaar zijn. Voor het projectteam kan het een uitdaging zijn om hieraan in de voorbereiding op een verstandige manier invulling te geven.

Ervaring uit de praktijk leert dat bouwbedrijven en architecten niet altijd bewust zijn van de impact fundamentele ontwerpkeuzes op het geluid. Het is daarom belangrijk om dit belang voldoende te onderstrepen en te zorgen voor relevante informatie.

5.1.3. *Vuistregels geluidarm ontwerp stalen bruggen*

Bij het ontwerpen van een stille of geluidarme stalenbrug is het nodig om in te grijpen in de keten van gebeurtenissen en bruceigenschappen die leiden tot geluidafstraling (zie figuur 5).

Voor het ontwerp van een nieuwe geluidarme stalen⁴ brug kunnen de volgende vuistregels gegeven worden om tot een geluidarm ontwerp te komen. Elk van onderstaande aspecten betreft een oplossingsrichting en dient bij het ontwerp nader onderzocht en gespecificeerd te worden.

- Dynamische reactie op het verkeer minimaliseren
 - Minimaliseer de dynamische respons van brugdek, houd daarbij rekening met passages van zware voertuigen
 - Vlak alignement realiseren met aanbruggen en aardenbaan om duik van het verkeer op de brug te voorkomen
 - Doorbuiging harren en van dwars- en langsliggers voorkomen
 - Oplegging zo dicht mogelijk bij de locatie waar voertuigen de brug oprijden, eventueel hulpoplegging in het midden van de brug
- Harde overgangen voorkomen
 - Voorkomen van hoogteverschillen tussen aanbrug en brugdek
 - Voorkomen van hoogteverschillen tussen rijizers van voegovergangen en wegdek
 - Minimaliseren van de dilatatiebreedte van de voegovergang
 - Kiezen voor een schuine (onder een hoek met de wegrichting) voegovergang
 - Kiezen voor stille voegovergangen
 - Voegen aan de onderkant afsluiten
- Secundaire aanstoting in de oplegging voorkomen
 - Speling voorkomen: niet meer dan 4 hoofdopleggingen
 - Uitsluitend zelfstellende hulpopleggingen
 - Oplegging buiten de rijstroken om 'kiepen' te voorkomen tijdens eenzijdige belasting
 - Dekluiken buiten rijsporen houden
- Rolgeluid verminderen
 - Kiezen voor een vlakke en zo fijn mogelijke slijtlaag
 - Voorkomen van grote overgangen in wegdektype dichtbij de brug
- Ontwerp brugdek optimaliseren
 - Een zwaar en relatief slappe constructie dempt trillingen beter dan een lichte stijve constructie: orthotrope dekken zijn licht en stijf. Zorgen voor voldoende massa en een hoge ingangsimpedantie onder de rijsporen

⁴ Dit document is hoofdzakelijk gericht op geluid van stalen bruggen. Bij betonnen bruggen zijn de aanbevelingen over 'Harde overgangen' eveneens relevant.

- Minimaliseren tot twee rijstroken per brugdek. Consoles liever losgekoppeld, liever 2 smalle bruggen naast elkaar dan 1 brede brug
- Onderkant brugdek afschermen
- Innovatief rijdek toepassen (mogelijk met isolatielaag tussen wegdek en dekplaat)
- Perforeren van plaatvelden en/of consoles om de afstraalefficiëntie te beperken
- Sandwichplanten (CLD) integreren
- Puntdempers voor specifieke frequenties (TMD) toepassen
- Ruimte onder de brug
 - Tunnelresonantie voorkomen door afmetingen af te stemmen zodat ze niet samenvallen met eigenfrequenties bruggdelen
 - Tunnelresonantie voorkomen door open pijlers toe te passen
 - Toepassen van Helmholtz resonatoren



figuur 10 Boven: schuine opstelling van half open pijlers, schuine voeg, onder: val met dichte onderkant (foto's M+P)

5.2. Eisen bij nieuwbouw

Geluideisen en beperkt materiaalgebruik zitten elkaar in de weg. Een valkuil is om zo efficiënt mogelijk te willen bouwen met een goede MKI score. In het maken van de uitvraag en de beoordeling van de inschrijving is het belangrijk om hier oog voor te hebben.

Maatregelen voor een geluidarm ontwerp van een brug kunnen spanning opleveren tussen de eisen en wensen voor verschillende ontwerpparameters van de brug. Zo is verstijven gunstig bij het voorkomen van doorbuiging maar ongunstig voor de afstraalefficiëntie. Het ontwerp moet daarom gebalanceerd zijn en afgestemd op de belasting en afmetingen.

In geluidgevoelige nieuwbouwprojecten is het erg lastig om een stil resultaat op te leveren als er al randvoorwaarden liggen vanuit een 'slank schetsontwerp' of een strikte MKI score.



figuur 11 Voorbeeld: langzaam en snel verkeer op één breed val. Vrachtwagens op één rijstrook brengen een groot oppervlak in beweging met relatief veel laagfrequent geluid tot gevolg (foto: M+P)

Opdrachtnemers onderschatten nogal eens de impact van ontwerpkeuzes op het geluid van de brug. Om geluid als gelijkwaardige 'top-eis' mee te kunnen nemen moet deze voldoende kwantitatief worden beschreven en opvolging krijgen.

Kwantitatieve geluideisen moeten al in beeld zijn bij het ontwerp van de vormgeving. Zonder deze randvoorwaarde kan een architect een beeldschoon ontwerp aanleveren dat niet op te lossen problemen oplevert bij het uitwerken tot een geluidarme brugconstructie.

Uit praktijkervaring komt naar voren dat gedurende het project wel eens een zijspoor wordt gekozen vanwege onvoorziene ontwikkelingen. Geluideisen worden in het vervolg nogal eens vergeten.

Het is daarom aan te bevelen om de verschillende (voor)ontwerpfases te toetsen op akoestische risico's.



figuur 12 Beweegbare brug voor- en na vervanging van het val. Nieuwe val is groter, zwaarder én stiller. Ontworpen met 'geluidreductie' als opdracht. (foto's M+P)

6. Vervanging en renovatie

6.1. Rekening houden met randvoorwaarden bestaande brug

6.1.1. *Informatie voor de (ambtelijk) opdrachtgever*

Onder VenR wordt verstaan het renoveren van een brug waarbij delen worden vervangen en delen worden gerenoveerd. Vaak is er werk aan het bewegingswerk en de elektrische installatie en wordt de bediening gemoderniseerd. Ook kan het wegdek, de voegovergangen en het val worden aangepakt.

Bij de vervanging of renovatie van een stalen val worden doorgaans aanpassingen gedaan die voortkomen uit wijzigingen in de verkeersbelasting en/of wensen vanuit beheer en onderhoud. Bij het ontwerp van de aanpassingen moet ook rekening gehouden worden met de bestaande situatie zoals de bestaande onderbouw en doorvaarthoogte.

De uitdaging bij het stiller maken van een brug bij VenR is doorgaans groter dan bij volledige nieuwbouw. Daarnaast is het belangrijk om vanaf het begin van het proces geluid mee te nemen als randvoorwaarde én deze voorwaarde te blijven bewaken in de processtappen voor én na de opdrachtverlening. Ook moet het belang van een stille brug afgewogen worden tegen de mogelijk extra kosten en een lagere MKI score door extra materiaalgebruik.

Hoofdstuk 3 van dit document geeft handvatten om te bepalen of er geluidhinder te verwachten is en een stille brug wenselijk is. De paragraaf over het ontstaansmechanisme van bruggeluid helpt om de juiste ontwerpkeuzes te maken.

6.1.2. *Informatie voor het projectteam: werkvoorbereiding*

Het projectteam dat aan de slag gaat met de voorbereiding van het onderhoud doet er goed aan om in de eerste fase naast de standaard omgevingsaspecten ondanks het gebrek aan wettelijk kader, ook geluidhinder te beschouwen.

Is de locatie dichtbij woningen? Zijn er al klachten over geluidhinder? Worden er wijzigingen aan de brug gedaan die impact kunnen hebben op de geluidafstraling? Deze informatie kan helpen om te bepalen of in het ontwerp van aanpassingen rekening gehouden moet worden met geluid.

Als geluid relevant is, dan is het zaak om dit vast te leggen in het programma van eisen. De eisen moeten voldoende kwantitatief en toetsbaar zijn.

Ervaring uit de praktijk leert dat bouwbedrijven zich niet altijd bewust zijn van de impact van fundamentele ontwerpkeuzes op het geluid. Het is daarom belangrijk om dit belang voldoende te onderstrepen. VenR biedt ook een kans om langdurige hinder te verminderen. Bij de aanpassingen kan daarom ook verder gekeken worden dan wat strikt vanuit beheer en onderhoud noodzakelijk is. Dat kan een (bestuurlijke) keuze zijn waardoor wellicht binnen de organisatie meer financiële middelen aan te boren zijn.

6.2. Do's en don'ts bij vervanging of renovatie van het brugval

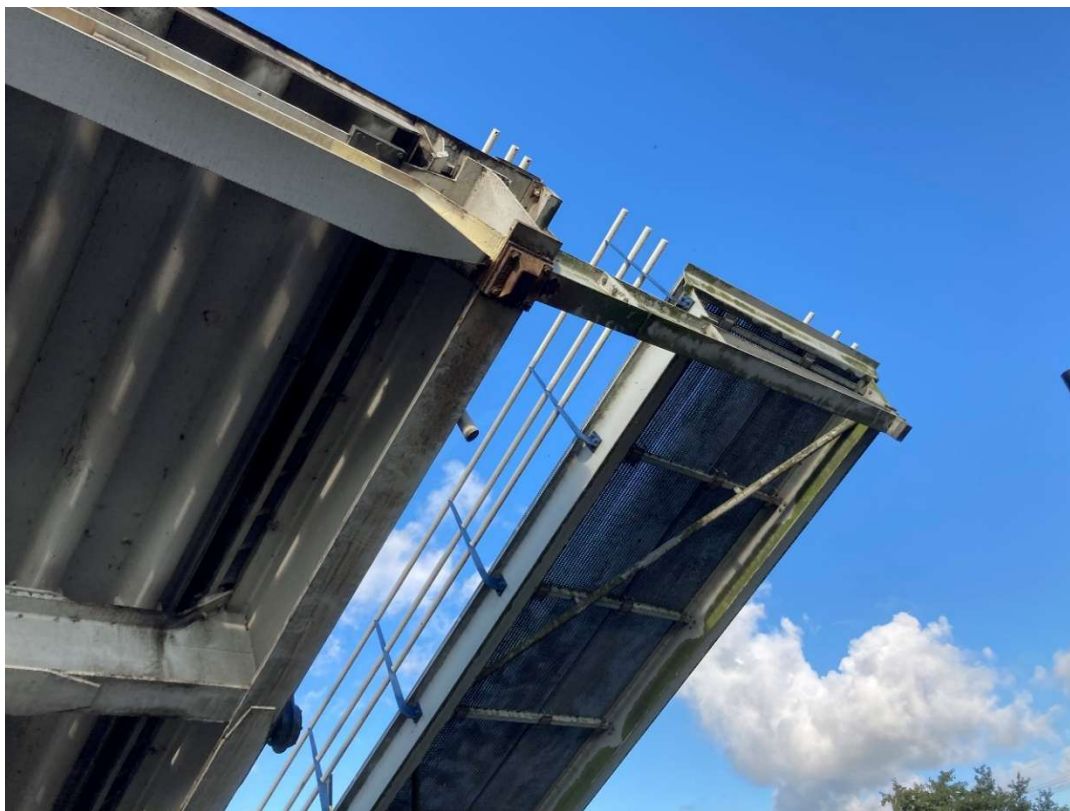
Omwonenden zijn doorgaans niet alleen gevoelig voor een geluidtoename maar ook voor verandering van het geluid.

Aandachtspunten t.a.v. geluid bij veel voorkomende renovatiewerkzaamheden aan een val:

- Vervanging van een houten brugdek door een lichter en stijver stalen orthotrope dek
 - Trillingen worden minder gedempt: risico op meer geluid
 - Afstraalefficiëntie neemt toe: risico op meer geluid
- Verbreding val met consoles
 - Dynamisch gedrag en eigenfrequenties veranderen: risico laagfrequent geluid
 - Resonantie in tunnel onder de brug wordt beïnvloed: risico op extra geluidversterking
- Vernieuwing slijtlaag
 - Standaard nieuwe slijtlaag is ruwer dan oude versleten slijtlaag: risico op extra geluid
 - In combinatie met overstap houten dek naar staal, extra risico op meer geluid
- Aanpassing bewegingswerk en opleggingen
 - Aandacht voor spelingsvrij systeem
- Vernieuwing voegovergangen
 - Aandacht voor hoogteligging zeer belangrijk
 - Pas stille voegovergangen toe

Een hogere verkeersbelasting en behoud van onderbouw is vaak een aanleiding om het hele val te vervangen. Aanvullende aandachtspunten bij vervanging van het val zijn:

- Een lichter val dan voorheen: vaak een gelaste constructie met orthotrope dek
 - Minder gedempt, meer trillingen: risico op meer geluid
 - Gevoeliger voor dynamische belasting: risico op laagfrequent geluid
 - Gelaste constructie is stijver en minder gedempt dan geklonken constructie
- Een breder val dan voorheen
 - Gevoeliger voor dynamische belasting
 - Gevoeliger voor extra resonantie in de 'tunnel' onder de brug
 - Gevoeliger voor temperatuurinvloed met meer moeite met afstellen voegovergang tot gevolg
- Randvoorwaarden alignement en doorvaarthoogte kunnen beperkend zijn voor de bouw van een stil val.
 - Niet alleen statisch doorbuiging toetsen, ook dynamische respons onderzoeken
 - Overweeg extra demping toe te voegen en/ of afstraalefficiëntie te beïnvloeden



figuur 13 Voorbeeld: aanpassingen aan een bestaande brug met impact voor geluid: vervanging houten rijdek door lawaaier stalen dek én uitbreiding met meetrillende consoles (foto M+P)

6.3. Quick win's

Ook in projecten waar geluid in eerste instantie een kleinere rol speelt of wanneer alleen kleine aanpassingen aan het bestaande val worden gedaan zijn er 'quick wins' die overwogen kunnen worden ter verbetering van de geluidssituatie. Voorbeelden zijn:

- Optimaliseren voegovergangen of als het mogelijk is, het vervangen voor een stille voeg
- Optimaliseren van de slijtlaag, fijne gradering
- Snelheidsverlaging, verkleinen van de aanstootkracht (enig effect bij significante aanpassing)
- Zelfstellende opleggingen toepassen om speling te voorkomen en trillingen te dempen
- Consoles loskoppelen en/of perforeren om trillend oppervlak te reduceren en resonanties in tunnel te beperken
- Heroverwegen van het aantal hulpopleggingen om klapperen te voorkomen
- Strengere eisen stellen aan de langsvlakheid
- Voegspleet breedte zo klein als mogelijk
- Afdichten onderzijde voegspleet
- Geluidabsorptie op een van de landhoofden
- (bij zeer ongedempte constructies) toepassen van CLD

Bij elke voorgenomen wijziging is het raadzaam om goed met de omgeving te communiceren. Een goede aanpak kan veel impact hebben op de beleving van geluid.



figuur 14 Links: voor geluid een ongunstige situatie met van boven naar beneden: de lawaaige slijtlaag en voegovergang en overgang naar akoestisch afwijkend asphalt. Rechts: val met stille voeg en stille slijtlaag op zowel de aanbrug als het val

6.3.1. Verstijven

Verstijven van plaatvelden van het rijdek en of verstijven van harren om doorbuiging bij dynamische belasting te beperken. Dergelijke aanpassingen vragen om aanvullende constructieberekeningen, las en conserveerwerk.

6.3.2. Perforatie

De geluidafstraling van trillende platen kan worden aangepakt door de platen te perforeren. Perforatie van plaatvelden heeft impact op de sterkte en kan daarom niet zonder onderzoek worden uitgevoerd. Perforatie van lichtbelaste brugonderdelen zoals randafwerking en rijdek van fiets/voetgangerspaden is in bestaande situaties mogelijk haalbaar. Deze maatregel vraagt om maatwerk, constructieberekeningen en onderzoek naar de effectiviteit, kosten en gevolgen voor B&O

7. Beheer en onderhoud

7.1. Geluidproblemen voorkomen

Het regelmatig inspecteren van de geluidrelevante zaken van een brug zal bijdragen aan het beheersen van de extra geluidemissie van die brug. Bij de inspectie moet aandacht zijn voor het zo nodig bijstellen of repareren van:

- oplegdruk en speling in opleggingen;
- hoogteligging en kwaliteit voegovergangen;
- aansluitingen wegdek van aanbruggen;
- speling in overige onderdelen zoals relingen, bebording en roosters.

Bij klein onderhoud rondom de brug toetsen of er geen invloed is op geluid:

- bij onderhoud aan de slijtlaag eenzelfde of kleinere steengradering toepassen;
- asfaltvervanging voor en na de brug: het vervangen van het asfalt door een (veel) stillere deklaag direct voor en na de brug kan er voor zorgen dat het geluid van de brug (extra) gaat opvallen. Afhankelijk van de situatie moet een afweging gemaakt worden of het een verstandige keuze is. In de afweging moet het effect voor bewoners dichtbij de brug en op grotere afstand meegewogen worden.



figuur 15 Hoogteverschil bij de voegovergang en speling in de oplegging door slechte afstelling en/ of temperatuurgedrag van het val leidt tot onnodige extra aanstoting en geluidtoename (foto's: M+P)

7.2. Geluidproblemen oplossen

7.2.1. Oorzaken onderzoeken

Geluidproblemen van bestaande bruggen kunnen verschillende oorzaken of combinaties van oorzaken hebben. De omschrijving van de klacht kan een aanwijzing zijn van het probleem, zeker als de hinder door een plotseling mankement is ontstaan.

Lastiger is het om oorzaken aan te wijzen als:

- er langdurig, vaak sinds groot onderhoud/ VenR, hinder aanwezig is;
- hinder in de tijd langzaam toeneemt;

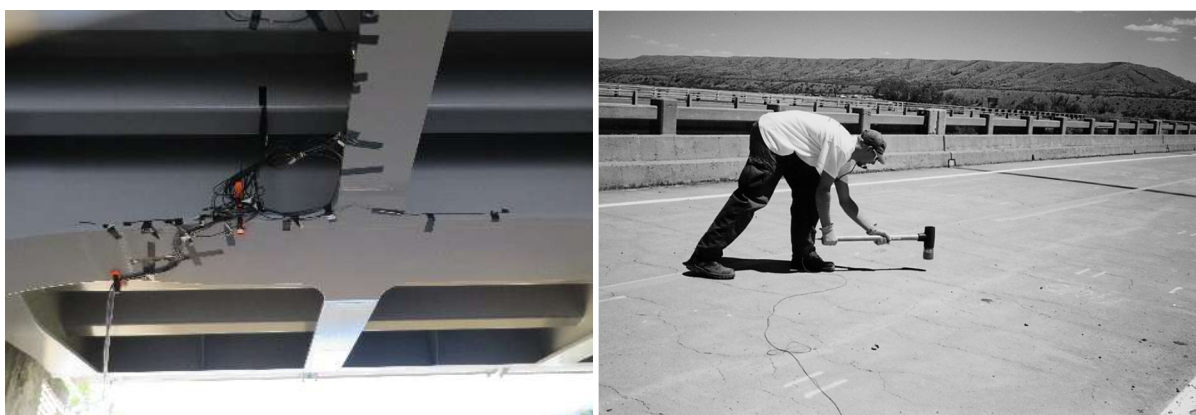
- de hinder af en toe ontstaat en/ of varieert in niveau;
- uit inspectie geen mankementen naar boven komen.

Vanwege het complexe ontstaansmechanisme van geluid van een brug is het belangrijk goed uit te zoeken wat er speelt voordat er aanpassingen aan de brug worden gedaan. Dit heeft een tweetal redenen:

- Ogenscheinlijk logische aanpassingen kunnen onbedoelde negatieve effecten hebben, bijvoorbeeld: verstijven verlaagt de energieopname maar verhoogt de afstraalefficiëntie;
- Hinder is gerelateerd aan beleving, om klachten op te lossen kan het effectiever zijn om in één keer een zo groot mogelijk effect na te streven in plaats van in kleine stappen verbeteringen door te voeren waarvan de resultaten door de omgeving niet worden opgemerkt.

7.2.2. **Specialistisch onderzoek naar de oorzaken van hinder**

Wanneer niet duidelijk is wat de oorzaken en oplossingen zijn voor de hinder is het mogelijk een gespecialiseerd bureau in te schakelen. Zij hebben niet alleen ervaring met mogelijk vergelijkbare situaties, maar ook geavanceerde meetapparatuur waarmee vastgesteld kan worden welke brugdelen bijdragen aan de hinder in de omgeving.



figuur 16 *Brugdek geïnstrumenteerd met trillingsensoren en rechts geïnstrumenteerde impedantie hamer voor onderzoek naar het gedrag van de brug (links foto M+P en rechts foto uit [12])*

7.2.3. **Maatregelen**

Naast reparatie van mankementen zijn er nog enkele maatregelen die zonder risico op neveneffecten genomen kunnen worden. Dit zijn maatregelen die de aanstoting van het val beperken. Denk daarbij onder andere aan:

- hoogteligging voegovergang tussen aanbrug en val optimaliseren;
- speling in oplegging wegnemen;
- vaste oplegblokken vervangen door zelfstellende opleggingen (verhelpen secundaire aanstoting);
- slijtlaag vervangen door een variant die minder trillingen veroorzaakt;
- standaard voegovergang vervangen door een geluidarme voegovergang.

En secundaire maatregelen zoals:

- verlagen verkeerssnelheid;
- beperking maximaal toegestane belasting.

Wanneer meer dan één maatregel nodig is, specifieke maatregelen (zie paragraaf 7.3) en/of aanpassingen aan de constructie moeten worden gedaan is aanvullend onderzoek nodig. Het gaat dan immers om een bredere ontwerpinspanning waarbij aan meerdere eisen voldaan moet worden. In dergelijk onderzoek moeten de volgende zaken aan bod komen:

- analyse van het samenspel van maatregelen;
- dimensionering, specificatie en locatie van maatregelen;
- kosten-baten analyse;
- gevolgen voor B&O.

7.3. Specifieke maatregelen voor stalen bruggen

Er is een aantal maatregelen bekend die, mits goed getuned, toepasbaar zijn op stalen bruggen. Deze maatregelen zijn enkel bedoeld om in bestaande situaties geluidproblemen terug te dringen.

De maatregelen worden in onderstaande paragrafen beknopt beschreven. De detailuitwerking is niet generiek te geven in dit document. De exacte uitwerking is voor iedere brug uniek.

7.3.1. Voorkomen van speling

Bij relatief brede bruggen kan doorbuiging in de as van de brug voorkomen. Wanneer verstijven niet mogelijk is kunnen hulpopleggingen worden toegepast. Vaste hulpopleggingen in het midden van de voor- en achterhar zorgen door het grote aantal oplegpunten voor een situatie met kans op wippen en klapperen. Zelfstellende hydropneumatische opleggingen bieden een goede oplossing. Deze oplegging is ook een oplossing voor bruggen die door temperatuureffecten niet continu spelingsvrij rusten op de vaste opleggingen.



figuur 17 Zelfstellende oplegging (foto: M+P)

7.3.2. Damping

Trillende plaatvelden die geluid afstralen kunnen gedempt worden met dempingsmateriaal. Meest gebruikt (bij dikkere platen) zijn sandwich panelen (ook wel aangeduid als Constrained Layer Damping "CLD"). Deze bestaan uit een flexibele laag die op de plaatvelden wordt gemonteerd en direct daarop (gelijmd) een stalen tegenplaat. Er is ten minste 40 jaar ervaring met dit type damping, vooral voor stalen spoorbruggen. Mits goed gedimensioneerd kan een groot effect worden bereikt [4]. Goed om te weten is dat deze maatregel gewicht toevoegt waardoor bij beweegbare bruggen ook onderzoek gedaan moet worden naar de haalbaarheid ten aanzien van het contragewicht en het

bewegingswerk. Aandachtspunt is ook de bevestiging van de panelen op de brug en de levensduur van deze bevestiging.

Dunnere plaatvelden en trogprofielen kunnen ontdreund worden met een eenvoudiger systeem bestaande uit één flexibele laag. Het effect van deze oplossingen met een enkele laag is kleiner dan die van de CLD. Deze oplossing heeft, net al CLD, impact op de inspecteerbaarheid van de coating van de brug.



figuur 18 CLD op een stalen brug (foto uit: [4])

7.3.3. Afschermen

Inpakken of dichtmaken van de onderkant van het val schermt het staal af waardoor de geluidafstraling gereduceerd wordt. Deze maatregel heeft impact op inspecteerbaarheid, onderhoudbaarheid en de doorvaarhoogte. Dichtlassen van de onderkant van het val kan gevolgen hebben voor het temperatuurgedrag van de brug en wordt om die reden vaak afgewezen.

Afdichten van de ruimte onder een voegovergang is zeer effectief bij betonnen- of vaste stalen bruggen [9]. Bij beweegbare bruggen is dit fysiek lastiger op te lossen.

7.3.4. Absorptie

Om de resonantie in de tunnel onder de brug te beperken kunnen verticale wanden van de pijlers voorzien worden van geluidabsorberende cassettes (absorptiemateriaal of Helmholtz resonatoren). Deze maatregel heeft invloed op de doorvaartbreedte en moet getuned worden op de specifieke situatie.



figuur 19 Absorptiemateriaal Schinkelbrug (foto uit: [7]) en frequentiespecifieke Helmholtz resonatoren (foto uit: [8])

7.4. Maatregelkeuze en uitvoering

7.4.1. Proces

Bij het oplossen van geluidproblemen van bruggen is het zinvol om een aantal processtappen te beschrijven. Dit is nodig om een objectieve afweging te kunnen maken op basis van kwantitatieve gegevens. De volgende aanpak wordt doorgaans gehanteerd:

1. inventarisatie hinder en vastleggen nulsituatie
2. onderzoek oorzaak
3. identificeren effectieve maatregelen
4. uitvoerbaarheidstoets
5. kostenopgave en afweging
6. uitvoeren
7. communicatie
8. effect kwantitatief bepalen

7.4.2. Kosten en baten analyse

De kosten van maatregelen aan bestaande bruggen zijn afhankelijk van afmetingen en benodigde dimensionering. De baten kunnen niet vooraf kwantitatief voorspeld worden. Een expert kan een kwalitatieve schatting maken op basis van ervaring met vergelijkbare bruggen.

Modelmatige kwantificering van maatregeleffecten is theoretisch mogelijk, echter vraagt het bouwen en kalibreren van een nauwkeurig model een significantie inspanning die doorgaans niet in verhouding staat met de projectkosten. Vanuit Rijkswaterstaat zijn pilotprojecten uitgevoerd waarbij op basis van modellen maatregelkeuzes zijn onderbouwd en in de praktijk toegepast. De ervaring is dat verdere ontwikkeling van modellen nodig is om het effect van maatregelen voldoende nauwkeurig te kunnen bepalen.

7.4.3. Kwantificeren van het resultaat

Het resultaat van de maatregelen kan kwantitatief met metingen worden vastgelegd. Er zijn ten minste drie argumenten denkbaar om het effect vast te leggen:

- verantwoording van budget/ inzet;
- mogelijkheid om terug te melden aan omgeving welke inspanning is geleverd en hoeveel dB het heeft opgeleverd;
- objectivering van klachten (vooraf en achteraf)
- vergroten kennis over effectiviteit van specifieke maatregelen.

8. Toekomstige ontwikkelingen

8.1. Toekomstige bouwwijze bruggen en dekken

8.1.1. Vernieuwing constructietechniek

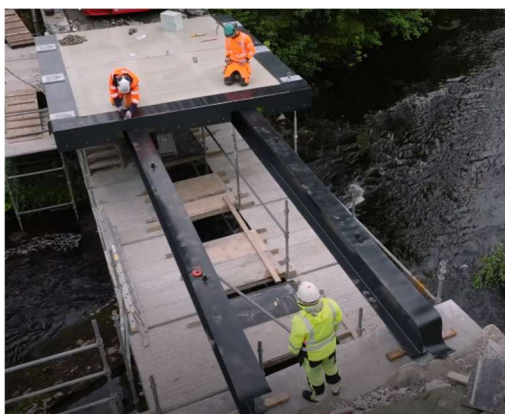
De meest in het oog springende vernieuwing op het gebied van productietechnieken is op dit moment het 3D-printen van betonnen bruggen. Dergelijke bruggen zijn op dit moment niet in beeld als vervanging van (beweegbare) stalen verkeersbruggen. Geluidtechnisch lijkt een toekomstige overstap naar beton op het eerste gezicht niet nadelig.

Andere technieken die aandacht krijgen maar nog niet standaard worden gebruikt bij kleinere bruggen zijn:

- Kunststof en composiet (hybride) brug(dek)en
 - Composiet bruggen en brugdekken komen meer en meer in gebruik zowel bij nieuwbouw als bij dek-vervanging (hout naar composiet).
- Hybride staal-beton bruggen
 - In Nederland in de spoorwereld een veelgebruikt concept, maar beperkt toegepast bij wegverkeer, akoestisch interessant (want stiller) maar in de huidige vorm niet geschikt als beweegbare ophaalbrug. Mogelijk wel kansrijk bij hefbruggen.



figuur 20 *Hybride kunstwerken van staal en beton (foto's: M+P)*



figuur 21 *Modulaire hybride staal-composiet brug (foto: nrk)*

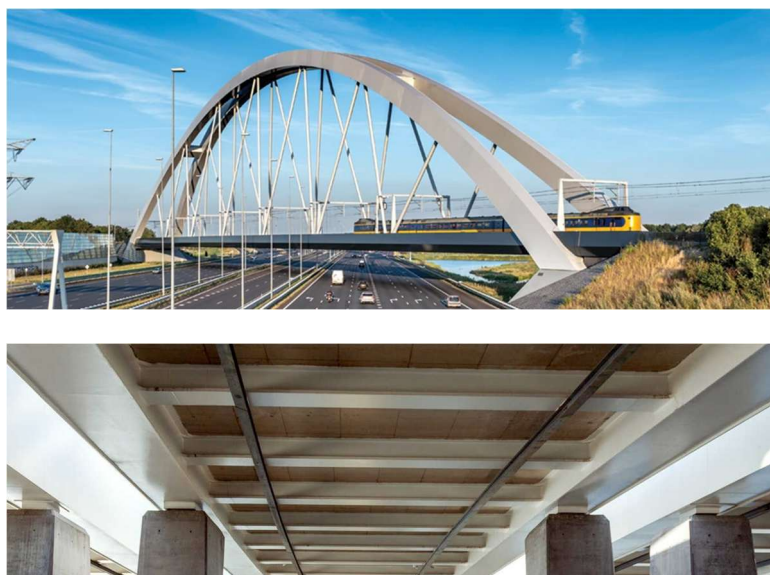
8.1.2. **Modulaire concepten en hergebruik**

Om aan de duurzaamheidsopgave te kunnen voldoen wordt nagedacht over standaardisatie van bruggen zodat bruggen (modulaire concepten), dekken en andere componenten hergebruikt kunnen worden. Het is voor geluid vanzelfsprekend relevant dat bij dergelijke standaardisatie de juiste keuzes worden gemaakt ten aanzien van de voor geluid relevante constructie-eigenschappen.

8.1.3. **Vorm naar functie versus functie naar vorm**

Architecten willen het liefst in alle vrijheid kunnen werken aan de vormgeving van een nieuwe brug. Bij projecten moet geprobeerd worden om voldoende ruimte te geven de aan architect, maar daarnaast (functionele) richtlijnen mee te geven, zodat bij het ontwerp al nagedacht wordt over gevolgen van keuzes voor het effect op de omgeving. Dat biedt ook de mogelijkheid voor de architect om geluidvriendelijke constructie-eigenschappen te ontwerpen.

Gedacht kan worden aan het voorschrijven van een hybride staal-beton brug of een minimale dynamische stijfheid. De ervaring leert dat een stille en mooie brug prima samen gaan. Echter, een ontwerp waarin aan de voorkant geen aandacht wordt gegeven aan geluid levert regelmatig een resultaat op dat achteraf lastig stil(ler) te maken is.



figuur 22 Voorbeelden van hybride staal-beton bruggen: boven: Zandhazenbrug, spoorbrug over de A1, (foto: ProRail), onder: Theunisbrug, Antwerpen, verkeersbrug (foto: ZJA)

8.2. **Rekening houden met veranderingen in woningbouw**

Er zijn niet alleen ontwikkelingen rond de bouwwijze van bruggen, ook rond woningbouw zijn er trends en veranderingen. Door de grote bouwopgave worden woningen ook op gevoeligere locaties ontwikkeld. Woningen worden vaker dichtbij het spoor of hoofwegen gebouwd. En als dat betekent dat in het overdrachtsgebied geluidschermen of andere maatregelen gerealiseerd worden, dan stelt dat nog hogere eisen aan het beperken van laagfrequent geluid. Immers, door afschermende maatregelen blijven vooral de lagere frequenties over. Ten slotte merken we ook vanuit de bewoners een toegenomen aandacht voor de kwaliteit van de leefomgeving.

Daarnaast zijn er veranderingen rond technische concepten bij woningbouw. De typologie van de woningen verschuift naar 'lichte woningbouw'. Deze woningtypes zijn mogelijk nog gevoeliger voor

laagfrequent geluid dan in het verleden. Houtskeletbouw en zeer goed geïsoleerde woningen laten nog minder hoogfrequent geluid door van buiten naar binnen. Binnenshuis wordt laagfrequent geluid daardoor nog dominantier wat een aandachtspunt is in de buurt van bruggen.

8.3. Innovatieve maatregelen voor geluidproblemen

Er is een aantal oplossingen voor bruggen waar (nog) onvoldoende ervaring mee is. Gedacht kan worden aan:

- Getunede puntdempers, waarmee specifieke geluidfrequenties van de brug gedempt kunnen worden.
 - Vraagt om akoestische engineering en productontwikkeling, geeft beperkte gewichtstoename.
 - Er zijn (nog) geen voorbeelden in Nederland bekend.
- Afsluiten tunnel onder de brug met grote deuren.
 - Werkt potentieel goed omdat geluid onder de brug wordt geïsoleerd van de omgeving.
 - Een nadeel kan zijn dat het hinder voor de scheepvaart geeft die normaal zonder brugopening door kan varen.
- Innovatief ontwerp van het rijdek, mogelijk het ontkoppelen van het rijdek en de brug met een flexibele tussenlaag.
 - Voorkomt trillingsoverdracht door rolexitatie naar liggers en opleggingen.
 - Technische uitdagingen ten aanzien van de uitvoering en levensduur.
- Verstijvingen onder de rijsporen
- Perforaties
- Dempen van de constructie met CLD, TMD
- Dempen van de akoestische ruimte onder de brug

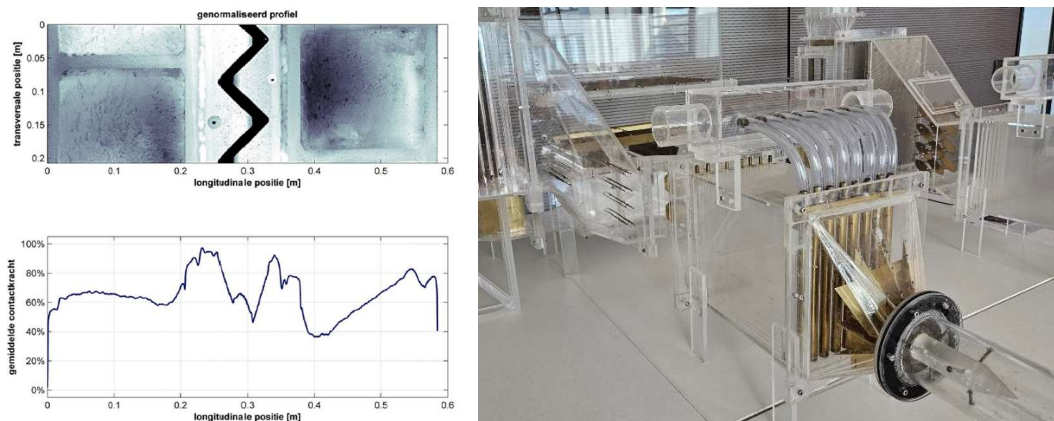
8.4. Effectbepaling

8.4.1. Modelonderzoek

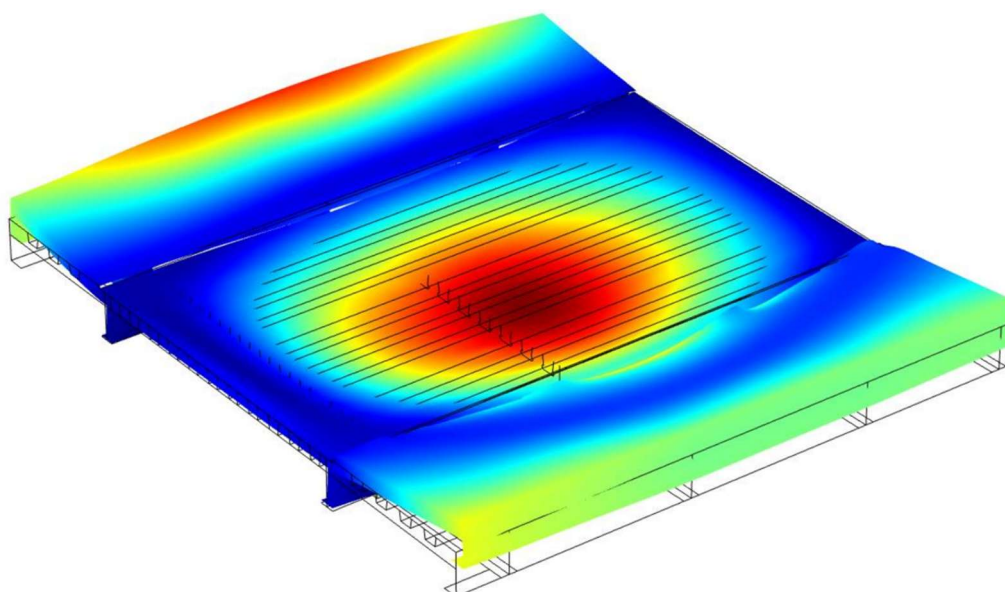
De akoestische principes van een innovatieve maatregel worden doorgaans getest aan de hand van een schaalmodel en/of rekenmodel ([8] en [10]).

Met name wegverkeersbruggen worden gebruikt door veel verschillende voertuigen, gewichtsklassen en rijksnelheden. Dit maakt dat samen met het complexe trilgedrag van een stalen brug, het niet eenvoudig is om het effect van maatregelen op de ervaren hinder in de omgeving, met computermodellen te schatten.

Het modelmatig kwantificeren van het effect na toepassing bij een (bestaande) brug met een rekenmodel is te realiseren. Het bouwen en verifiëren van de uitkomsten van dergelijke rekenmodellen vergt echter wel veel expertise en een intensieve inspanning. Ook de onzekerheid in modellen levert vaak vragen op ten aanzien van de waarde van de modeluitkomst versus het resultaat in de praktijk. Een andere mogelijkheid is om met schaalmodellen de werking van opzichzelfstaande maatregelen te toetsen. Dergelijke modellen kunnen een goede voorspelling geven van de werkelijkheid.



figuur 23 Voorbeelden van modelonderzoek. Links: rekenmodel contact-krachtverloop tijdens een voegpassage. Rechts: testen van akoestische maatregelen met een schaalmodel (bron: M+P)



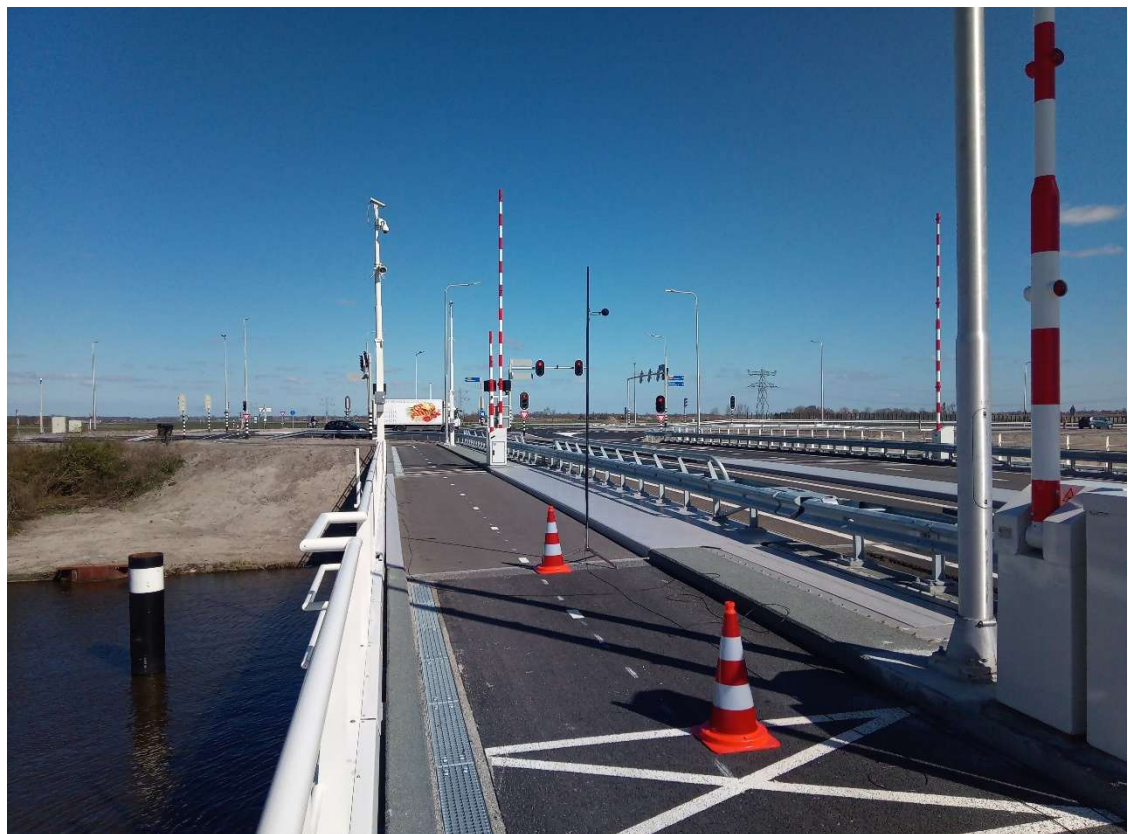
figuur 24 Numeriek model voor onderzoek naar trilvormen in een lawaaiig brugdek (bron: M+P)

8.4.2. Metingen

Het effect van maatregelen kan middels meetonderzoek kwantitatief worden bepaald. Metingen leveren niet alleen een bijdrage aan verificatie en onderzoek naar innovaties, maar geven ook houvast bij de beoordeling van uitgevoerde werkzaamheden. Zowel opdrachtgever als omwonenden hebben baat bij inzicht in het effect van de genomen maatregelen.

Voor het uitvoeren van metingen zijn diverse maatwerk en gestandaardiseerde aanpakken beschikbaar. Bij complexe en grote objecten zoals bruggen wordt er meestal met meerkanaals meetsystemen gewerkt waarmee met grote nauwkeurigheid simultaan op tientallen meetpunten geluid en trillingen kan worden gemeten. De metingen geven inzicht in overall effecten (bijvoorbeeld

het effect van de maatregelen in dB's) en in specifieke details, zoals de frequentiekaracteristiek van het geluid en trillingsvormen op specifieke locaties.



figuur 25 Geluidmetingen aan een brug met (boven) de schematische weergaven microfoonposities en (onder) een praktijkvoorbeeld (foto's M+P)

9. Eisen en toetsing

9.1. Het stellen van eisen aan geluid

9.1.1. *Wat is geregeld vanuit de geluidregelgeving?*

Vanuit de geluidregelgeving worden omwonenden van bruggen door de Wet geluidhinder en Wet milieubeheer niet beschermd tegen de verhoogde geluidemissie en de specifieke geluiden rondom een brug. Met de nieuwe Omgevingswet moet in een geluidberekening wel gerekend worden met een brugtoeslag als het aannemelijk is dat een stalen brug of kunstwerk een verhoogde geluidemissie geeft. De methode hoe die brugtoeslag vast is te stellen, is niet omschreven in de regeling.

Het is dus niet vanzelfsprekend dat omwonenden rondom stalen bruggen beschermd worden tegen geluidhinder. Het is de verantwoordelijkheid van het bevoegd gezag om in voorkomende situaties de brugtoeslag toe te passen in een geluidonderzoek. Dit vraagt nog om een nadere modelleringsinstructie. Bij nieuwbouw of renovatie is het relevant om de geluideisen te verankeren in het bestek. De manier waarop dat kan wordt in dit hoofdstuk uitgewerkt.

9.1.2. *Wat kun je regelen in contracteisen?*

Het is mogelijk om in lijn met de RTD 1007-3 [2] voor voegovergangen en het "Beoordelingsprotocol geluid bij bruggen" [5] eisen te formuleren waaraan een nieuwe of vernieuwde brug moet voldoen. Die eisen worden dan per project of werk opgenomen in de contracten.

Een risico om dat per contract of werk te regelen, is dat je er dan vanuit gaat dat iedereen die betrokken is bij het opstellen van het contract goed op de hoogte is van de materie. Een voegovergang of brug wordt vaak voor tientallen jaren aangebracht. Aanpassingen die achteraf moeten gebeuren zijn vaak technisch niet mogelijk en dat wat wel mogelijk is, is vaak minder effectief dan het geval dat bij ontwerp een geluidarmere keuze was gemaakt. Het gevolg kan zijn dat, vanwege het ontbreken van een degelijke juridische basis en de hoge kosten die met sloop en vervanging gemoeid zijn, er geen of nauwelijks effectieve maatregelen genomen worden. De omgeving kampt dan voor de komende tientallen jaren met geluidhinder.

Maar bovenstaande geldt net zo goed wanneer de eisen wel duidelijk geformuleerd zijn in een bestek en deze achteraf worden beoordeeld. De geluidssituatie is een resultaatverplichting die pas achteraf via metingen kan worden getoetst. Wanneer een situatie niet blijkt te voldoen, kan de schade wel gereclameerd worden bij de opdrachtnemer, maar de ontstane situatie blijft lastig te repareren. Het is erg ongemakkelijk om een nieuw opgeleverde brug te moeten afsluiten voor vervanging van de voegen of de deklaag. Om nog maar niet te spreken van constructieve aanpassingen. Ook hier is het waarschijnlijk dat de omgeving dan met een onwenselijke geluidssituatie achterblijft.

Het belangrijkste credo bij het stellen van geluideisen is daarom: Zoveel mogelijk vooraf aantonen! Zie de procesbeschrijving in 7.4.

Voegovergang

Voor voegovergangen wordt deze aanpak al een aantal jaren gehanteerd. Enkele jaren na het opstellen van het beoordelingsprotocol voor voegen, is voor elk voegtype een GeluidLabelWaarde vastgesteld, gebaseerd op een grote dataset van meetgegevens. Wanneer een nieuwe voeg wordt aangebracht of een voeg wordt vervangen, vindt een toets plaats of de voorgenomen voegtype een GeluidLabelWaarde heeft die past in die situatie. Wanneer een voegtype wordt aangeboden die hier niet aan kan voldoen, kan deze niet zonder meer worden toegepast. De GeluidLabelWaarde is

meettechnisch vastgesteld en beschrijft het niveau waaraan statistisch gezien in 90% van de gevallen zal worden voldaan.

Wegdek / slijtlaag

Ook voor de wegverharding zelf bestaan er methoden om de geluidprestatie vooraf te definiëren en desgewenst achteraf te toetsen. Voor veel toegepaste wegdektypen bestaan geluidkentallen in de vorm van de wegdekcorrectie (C_{wegdek}). Op basis hiervan wordt de geluidprestatie vooraf aangetoond. Een toetsing kan achteraf plaatsvinden. De CPX-methode (een geluidmeting met behulp van een meetaanhanger) is een veelgebruikte methode.

Brugconstructie

Het vooraf aantonen van de geluideigenschappen voor de gehele brugconstructie is een stuk complexer. De brug kan beschouwd worden als een systeem van onafhankelijke onderdelen die het geluid kunnen opwekken, versterken of uitdempen (zie hoofdstuk 3). In het 'Beoordelingsprotocol geluid bij bruggen' wordt onderscheid gemaakt tussen de aanstoting en de afstraling. De aanstoting heeft betrekking op de voegovergangen en het rijdek. Deze onderdelen kunnen voor geluid goed gespecificeerd worden en vooraf beoordeeld worden. De afstraling van de brug heeft betrekking op een combinatie van trillingsoverdracht, stijfheid, constructie, opleggingen, et cetera. Het beoordelingsprotocol schrijft hier voor om dit achteraf te beoordelen aan de hand van een brugtoeslag. De brugtoeslag is niet vooraf rekenkundig vast te stellen op basis van het ontwerp. Wel kunnen, op basis van de juiste kennis (zoals in dit document), aanpassingen en verbeteringen aan het ontwerp worden gedaan die een stalen brug ook stil(ler) maakt. Door de brugtoeslag voor te schrijven, wordt de opdrachtnemer gedwongen om zijn ontwerp geluidtechnisch te laten beoordelen.

tabel III

Akoestisch te beoordelen brugaspecten

onderdeel	geluideis op basis van	Aantoonbaar vooraf	controlemeting achteraf
Voegovergang	GeluidLabelWaarde	ja	Niet nodig, maar is wel mogelijk
Wegdek of slijtlaag	C_{wegdek} , geluideffect	ja	Niet nodig bij standaard wegdek; Wel nodig bij afwijkende verharding
Stalen brug	Hinderscore en brugtoeslag. Of, via vergelijking nulmeting en nameting	ja, met enige onzekerheid: Combinatie van meten (aan vergelijkbare bruggen) en rekenen (FEM-BEM)	Ja. Verantwoordelijkheid en risico bij aannemer leggen. Meting is nuttig ten aanzien van kennisontwikkeling en dient ter verantwoording aan de omgeving.

Voor deze drie onderdelen worden in de volgende paragraaf suggesties gedaan hoe je dat in een concreet bestek zou kunnen uitwerken.

9.2. Contracteisen

9.2.1. Geluideis voegovergang

Het stellen van een eis aan de voegovergang kan relevant zijn voor zowel de (grotere) vaste bruggen als beweegbare bruggen.

Voor voegovergangen kan in een bestek direct verwezen worden naar de RTD 1007-3. De RTD schrijft voor wat de geluideis is in een bepaalde situatie op basis van de aanwezige wegverharding en rijsnelheid. Alleen een voeg met een GLW (RTD 1007-1 Meerkeuzematrix voegovergangen) lager dan de geluideis kan worden toegepast. De GLW is alleen bepaald voor lichte motorvoertuigen en wordt aan de bovenzijde van het kunstwerk of brug vastgelegd.

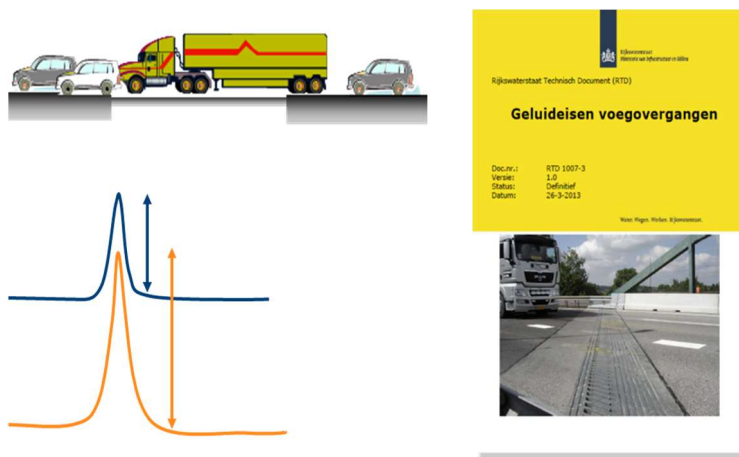
Een geluideis kan als volgt worden gedefinieerd:

Het geluidniveau boven het kunstwerk, als gevolg van passages van lichte motorvoertuigen over de voegovergang, mag het geluidniveau van het stilste aangrenzende wegdek met niet meer dan 5 dB(A) te overschrijden. De geluideis wordt berekend volgens de methode in de RTD 1007-3.

Verificatie vooraf:

De geluideigenschappen van de voegovergang dienen vooraf geverifieerd te worden aan de hand van de GeluidLabelWaarde. De GeluidLabelWaarde dient lager te zijn dan de geluideis.

Voor voegovergangen met een grote dilatatiecapaciteit of bewegende brugdekken is het technisch niet altijd mogelijk om aan de geluideisen te voldoen. In deze gevallen geldt het ALARA – principe ('As Low As Reasonably Achievable'). Dit houdt in dat de best toepasbare techniek zal worden toegepast.



figuur 26

De geluideis bij voegovergangen is gerelateerd aan het aangrenzende wegdektype. Een stiller wegdek betekent ook een strengere geluideis voor de voegovergang.

Controlemeting achteraf:

Het kan zijn dat er achteraf getwijfeld wordt aan de geluidprestatie van de opgeleverde voeg. De RTD 1007-3 schrijft de meetmethode voor hoe een controlemeting plaats moet vinden.

9.2.2. *Geluideis wegdek*

Het stellen van een eis aan de deklaag is vooral relevant zijn voor de (grotere) vaste bruggen waar keuzemogelijkheden zijn ten aanzien van de deklaag. In die situatie is het ook mogelijk om via CPX-metingen de eigenschappen van de deklaag te meten. Dat is bij beweegbare bruggen niet het geval. Onderstaande uitwerking is voor die situatie niet geschikt. Voor beweegbare bruggen zou een eis gesteld kunnen worden aan de gradering van de steengrootte of algemener aan de textuur van de deklaag.

De akoestische eigenschappen van wegdekken zijn gedefinieerd in de wegdekcorrectie, ofwel C_{wegdek} . Voor 17 standaard wegdekcategoryën is de wegdekcorrectie vastgelegd in de Omgevingsregeling [15]. De geluideis die aan het wegdek gesteld wordt, kan daarbij aansluiten aan het wegdektype waar in het vooronderzoek of in geluidmodellen voor wegverkeer rekening mee is gehouden. De C_{wegdek} van het toe te passen wegdek moet voldoen aan de gestelde geluideis. Daarmee is vooraf geverifieerd of het toe te passen wegdek aan de geluideis voldoet.

Het kan zijn dat een opdrachtnemer een wegdek wil toe passen dat niet past binnen een van de 17 wegdekcategoryën. Op brugdekken is dat een veel voorkomend punt. Door de beperkte draagkracht van een brugdek, worden dunnere laagdikten toegepast en op beweegbare bruggen gebruikt men vaak een slijtlaag.

Een geluideis kan als volgt worden gedefinieerd:

Met geluidreductie of -toeslag (ΔL) wordt bedoeld het verschil tussen de geluidproductie van een verkeersstroom met bepaalde samenstelling en snelheid op het referentiewegdek en de geluidproductie van dezelfde verkeersstroom op het betreffende wegvak, uitgedrukt in dB en berekend conform de Meet- en rekenmethode geluid wegen. (MRG Wegen, Bijlage IVe van de Omgevingsregeling, paragraaf 2.4). "De geluidreductie (of -toeslag) (ΔL) dient minimaal ...dB te bedragen voor lichte motorvoertuigen bij ... km/h."

Er wordt hier gesproken over een geluidreductie of -toeslag (ΔL) omdat de gekozen deklaag minder geluid kan maken dan op het referentiewegdek (dan geluidreductie) of meer geluid (dan is er sprake van een geluidtoeslag).

Verificatie vooraf:

De akoestische eigenschappen van het toegepaste wegdek dienen vastgelegd of vastgesteld te zijn volgens de methode C_{wegdek} (Hoofdstuk 4 MRG Wegen, Bijlage IVe van de Omgevingsregeling). Op basis van de wegdekcorrectie voor lichte motorvoertuigen dient het product te voldoen aan de geluideis. Indien er geen C_{wegdek} beschikbaar is dienen de resultaten van geluidmetingen (SPB-[1] en CPX-methode) aangeleverd worden ter onderbouwing.

Controlemeting achteraf:

Voor wegdekverharding wordt de CPX-methode (ISO 11981-2) meestal toegepast om de geluideigenschappen meettechnisch te verifiëren. Die meting is eenvoudig uit te breiden met een textuurmeting. De hieruit berekende geluidreductie kan vergeleken worden met de geluideis.

Wanneer ook de brugtoeslag wordt gemeten, kan de CPX-meting eventueel worden vervangen door een geluidmeting naast de rijbaan. De meetopzet van de brugtoeslag wordt daarmee uitgebreid met een extra meetmicrofoon. Het geluid wat ontstaat ten gevolge van het wegdek wordt dan op een gelijke manier gemeten als het geluid van de voegovergangen. Hiertoe dient een extra microfoonpositie op de brug geplaatst te worden zodat het band-wegdek geluid zowel op overall niveau als spectraal kan worden bepaald. De afstand van de microfoon tot de voegovergang dient zodanig te zijn dat het geluid van de voegovergang het meetresultaat niet beïnvloedt. Aanvullend op

de geluidmeting kan ook hier een textuurmeting worden uitgevoerd. Hieruit zijn de textuurparameters van het wegdekoppervlak op de brug te bepalen. De textuurparameters geven een indicatie van de geluidemissie van het wegdek. Dit laatste geldt met name voor slijtlagen.

9.2.3. **Brugtoeslag**

In situaties waarbij het brugdek van beton is, zal het brugdek als geheel weinig geluid afstralen. De eventuele geluidhinder wordt in die gevallen veroorzaakt door de voegovergangen of het wegdektype op het brugdek zelf. Met de geluideisen uit de vorige twee paragrafen kan dan worden volstaan. Bij stalen (beweegbare) bruggen zal in veel gevallen het hele rijdek geluid afstralen. Dat vraagt dus om een aangepaste beoordelingssystematiek. Het "Beoordelingsprotocol geluid bij bruggen" beschrijft een methode om de hinderscore en de brugtoeslag te bepalen. Bij de bepaling van de hinderscore wordt op een zekere afstand van de brug gekeken naar het aandeel van laagfrequent geluid. Meer aandeel van het geluid in de lagere frequenties betekenen in de regel een hogere hinderscore.

De brugtoeslag wordt op twee posities bepaald, boven en onder de brug (respectievelijk CW1 en CW2). Deze toeslagen zijn bedoeld om de verhoogde geluidemissie in rekening te brengen in de theoretische rekenmodellen, hoewel deze berekeningsmethode nog niet is vastgelegd in de regeling. Aan deze brugtoeslag kan ook een eis gesteld worden. In het onderstaande voorbeeld is uitgegaan van een eengetalswaarde voor de brugtoeslag, maar een uitbreiding naar een eis per octaafband of een curve (per octaafband een ander eis), is ook mogelijk.

Een geluideis kan als volgt worden gedefinieerd:

Renovatie of vervanging: De hinderscore en geluidtoeslag mag in de nieuwe situatie niet zijn toegenomen ten opzichte van de oude situatie.

Nieuwbouw: De hinderscore, bepaald conform het Beoordelingsprotocol geluid bij bruggen, is lager dan 15 (geen hinder of lichte hinder). De brugtoeslag (CW1 en CW2) is maximaal .. dB resp. .. dB.

tabel IV

Hinderscore op basis van laagfrequent geluid bij bruggen. (Bepaald met het verschil tussen het C-gewogen en het A-gewogen geluidniveau).

dB(C) minus dB(A)	Extra hinder door laagfrequent geluid
<10	Geen
11-15	Licht gehinderd
15-20	Duidelijke hinder
>20	Ernstige hinder

Verificatie vooraf:

Op basis van een brugontwerp is het, rekening houdend met enige onzekerheid, mogelijk om de hinderscore of brugtoeslag te berekenen. Hiervoor worden metingen aan bruggen met een grote gelijkenis gebruikt als invoer voor een FEM-BEM analyse. Het wordt sterk aanbevolen om het brugontwerp aantoonbaar vooraf akoestisch (extern) te laten beoordelen.

Controlemeting achteraf:

Vaststellen van de hinderscore en de brugtoeslag met metingen volgens het "Beoordelingsprotocol geluid bij bruggen".

10. Literatuur

- [1] NEN-EN-ISO 11819-1:2011, "Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise - part 1: The Statistical Pass-By Method SPB"
- [2] RTD1007-3, "Rijkswaterstaat Technisch Document (RTD) Geluideisen voegovergangen"
- [3] M.G. Dittrich e.a., "Onderzoek Schinkelbruggen", TNO, 2016
- [4] B. Paanakker, "State-of-the-art Geluidsreductie bruggen", ProRail Kenniscentrum Spoorgeluid, 2007
- [5] "Beoordelingsprotocol geluid bij bruggen", Provincie Noord-Holland, 2016
- [6] SBR deel B, Hinder voor personen in gebouwen, meet- en beoordelingsrichtlijn, augustus 2002
- [7] www.bruggenvanamsterdam.nl
- [8] E.J. Ancich, "Structural Dynamics Of Modular Bridge Expansion Joints Resulting In Environmental Noise Emissions And Fatigue", University of technology Sydney, 2011
- [9] J. Bohatkiewicz e.a., "Influence of the Acoustic Cover of the Modular Expansion Joint on the Acoustic Climate in the Bridge Structure Surroundings", MPD materials 2020,13, 25 juni 2020
- [10] M.G. Dittrich & A. Berkhoff (TNO), "Stalen verkeersbruggen inventarisatie kennis en werkplan vanaf 2020", Rijkswaterstaat, 10 maart 2020
- [11] R. Heywood e.a., "Guide To Road Profile Unevenness And Bridge Damage", Austroads Publication No. AP-T13/02, 2002
- [12] J.P. Lynch, "Decentralization of wireless Monitoring and control technologies For smart civil structures", University of Michigan, 2002
- [13] C.C. Tollenaar, D.F. de Graaff, A.A.M. Bakker, "Tijd om na te denken over nieuwe, stille bruggen", publicatie Land en Water nr. 7/8, 2016
- [14] C.C. Tollenaar, D.F. de Graaff, "Noise nuisance caused by movable bridges", Euronoise publications 2015
- [15] Bijlage IVe van de Omgevingsregeling (Meet- en rekenmethode geluid wegen), 1-1-2024
- [16] Kader Akoestisch Onderzoek Wegverkeer, Wet milieubeheer, 26 oktober 2022
- [17] Kader Akoestisch Onderzoek Wegverkeer, Omgevingswet, 1 december 2022

11. Begrippen en afkortingen

	Definitie
A-weging	Een frequentieafhankelijke weging op het geluidsdrukkniveau welke de karakteristiek van het menselijk gehoorzintuig benadert
VenR	Vervanging en Renovatie. Dek- of valvervanging of renovatie, vaak met behoud van bestaande landhoofden/ onderbouw
Tonaal geluid	Continu geluid met één of meer opvallend aanwezige tonen
Laagfrequent geluid	In dit document bedoelen we de lagere frequenties in het geluidspectrum. Dit zijn de 'bastonen'. Deze spelen bijvoorbeeld een rol als omwonenden spreken over dreunend geluid of onweersgeluid.
Intermitterend geluid	Af en toe voorkomende verhoging van de niveaus: bijvoorbeeld passage van een voertuig over een brug op een rustige weg
Impulsgeluid	Kortdurend piekgeluid
Val	Beweegbare deel van het brugdek dat open gaat om scheepvaart te kunnen laten passeren
Brugdek	Constructie waar het wegdek op ligt. Het brugdek rust op de onderbouw
Onderbouw	Dragende constructie: geheel van fundering, landhoofden, pijlers
Oplegging	Het steunpunt waar een constructie op rust en een verbinding die krachten overdraagt naar de ondersteunende constructie
Gevel	Een bouwkundige constructie die een ruimte in een woning of gebouw scheidt van de buitenlucht, daaronder begrepen het dak (Wet geluidhinder)
Kunstwerk	Wegbouwkundige en/of waterbouwkundige constructie (zoals viaducten, bruggen en tunnels)
MKI	Milieu kosten indicator: onder andere gerelateerd aan materiaalgebruik
Resonantie	Frequentieafhankelijke versterking van het geluid
Harren	Dwarsbalk/ -ligger aan begin en einde van rijdek, bijvoorbeeld de ligger die in contact is met de oplegging
Voegovergang	Vaak de overgang tussen asfalt op de weg en het wegdek op de brug. Meestal uitgevoerd met een stalen deel en smalle opening

Colofon

Opdrachtgever: Provincie Utrecht
Stedelijke Leefomgeving, team Milieu
Contactpersoon: Geert Verhoofstad

Archimedeslaan 6
3584 BA Utrecht
www.provincie-utrecht.nl

Opdrachtnemer: M+P raadgevende ingenieurs BV
Contactpersonen: Christiaan Tollenaar, Ronald van Loon en Jan Hooghwerff

Wolfskamerweg 47	Visserstraat 50
5262 ES Vught	1431 GJ Aalsmeer
www.mp.nl	

Kenmerk: M+P.PUT.1061.1

Datum: 16 oktober 2024