

Defensie en Veiligheid
Oude Waalsdorperweg 63
2597 AK Den Haag

www.tno.nl

T +31 88 866 10 0065 44

TNO-rapport

TNO 2022 R10623

Verkenning effect vezelversterkte brugdek op geluid

Datum	April 2022
Auteur(s)	M.G. Dittrich R. Kurylek F. Staats
Classificatie rapport	TNO Publiek
Aantal pagina's	34 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	3
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Zuid Nederland
Projectnaam	Geluidsonderzoek VVK wegdek brug Urmond
Projectnummer	060.51152

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst. Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2022 TNO

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
2	Vergelijkende metingen aan twee bestaande bruggen.....	4
2.1	Beschrijving bruggen	4
2.2	Opzet Metingen	7
2.3	Meetresultaten	9
3	Indicatieve berekeningen bestaande brug Urmond en nieuwe ontwerp	14
3.1	Bestaande en nieuwe brug Urmond	14
3.2	Akoestisch rekenmodel	16
3.3	Akoestische verschillen	18
4	Conclusies.....	20
	Bijlage(n)	
	A Modelling	
	B Rekenresultaten voor 3 brugvarianten	
	C Spreiding in de metingen en spectra tabellen	

1 Inleiding

TNO heeft op verzoek van Rijkswaterstaat een quickscan uitgevoerd naar het potentiële effect van vezelversterkte kunststof (VVK) brugdekken op de geluidemissie. Aanleiding daarvoor is het nieuwe ontwerp van een brug in Urmond, waarop een dergelijke dek toegepast zal worden.

VVK brugdekken hebben het voordeel van een laag gewicht met hoge sterkte, en zijn zowel bij nieuwbouw als bij renovatie toepasbaar.

Hoewel enkele bruggen al met dit type dek bestaan, is nog niet duidelijk of de geluidemissie anders is dan bij een stalen dek of staal-beton dek.

Bekend is dat bij bruggen met stalen dekken laagfrequente geluidhinder kan ontstaan bij passages van vrachtwagens voor woningen in de buurt. Soms kunnen voegen ook hinder veroorzaken in het middenfrequente gebied.

De stand van kennis voor geluid van stalen bruggen is samengevat in [1].

Om een eerste indicatie te krijgen zijn metingen uitgevoerd aan twee bestaande bruggen met en zonder VVK dek. Tevens zijn indicatieve berekeningen uitgevoerd aan het bestaande en het nieuwe ontwerp van de brug in Urmond, onderdeel van de Mauritslaan.

In dit rapport worden de bevindingen van de metingen en van de berekeningen gepresenteerd.

2 Vergelijkende metingen aan twee bestaande bruggen

2.1 Beschrijving bruggen

Twee bruggen zijn geselecteerd om de gemeten geluidemissies te vergelijken:

- De brug Locht bij Kerkrade, met VVK dek;
- De brug Berg bij Berg aan de Maas in Urmond, met betondek.

Beide bruggen zijn vakwerkbruggen met hoofdliggers, dwarsdragers en langsliggers, met het dek daarop bevestigd. De brug Berg is vrijwel gelijk aan de bestaande brug Urmond/Mauritslaan en is daarom als referentie representatief. De brug Locht heeft een iets andere vakwerkconstructie en afmetingen van de steunprofielen, maar lijkt redelijk op brug Berg afgezien van het VVK dek.

Op deze bruggen is geluid gemeten volgens het meetvoorschrift bruggeluid van Rijkswaterstaat. Ook zijn dektrillingen gemeten ter bepaling van de demping. Op beide bruggen zijn passagemetingen uitgevoerd met behulp van een vrachtwagen die een reeks ritten bij 40-50 km/h maakte.

Brug Locht

De brug Locht is een gerenoveerde vakwerkbrug over de Miljoenenlijn in de buurt van Kerkrade (figuur 1). Het dek is in de breedte gedeeld in een deel voor gemotoriseerd verkeer en een deel met fietspad en voetpad. Ook zijn deze dekken in de lengterichting gedeeld met een voeg in het midden.

Op het brugdeel voor gemotoriseerd verkeer past niet meer dan één voertuig in de breedte, waardoor er nooit passages in beide richtingen tegelijk voorkomen.

Het VVK dek is bevestigd op stalen langs- en dwarsprofielen middels kikkerplaten.



Figuur 1 Burg Locht bij Kerkrade, met vierdelig VVK dek. Boven: bovenzijde, linksonder: onderzijde, rechtsonder: dwarsvoeg in beide dekken.

Brug Berg

De brug Berg in Urmond (figuur 2) ligt over het Julianakanaal, met een lengte van 78 m. Deze brug is ook een stalen vakwerkconstructie, maar voorzien van een betonnen wegdek met asfalt. Hier kan het verkeer wel in beide richtingen tegelijk rijden, vrachtwagens en auto's kunnen elkaar net in de breedte passeren.

Deze brug is in 2017 gerenoveerd en is voorzien van houten fietspaden aan beide zijden, ondersteund met consoles aan de buitenkant van de brug.



Figuur 2 Brug Berg in Urmond met betonnen hoofdrijdek en fietspaden op consoles.

De hoofdafmetingen van de beide bruggen staan in tabel 1.

Tabel 1 Hoofdafmetingen van brug Locht en brug Berg.

	Brug Locht	Brug Berg
Lengte	53,4 m	78 m
Breedte	11 m	12 m
Breedte rijdek	3 m	5,7 m
Breedte fietsdek	3 m	2,45 m
Hoogte boven water of bodem	8 m	7,7 m
Hoogte vakwerk	5,3 m	Begin en eind 5,29 m, midden 6,9 m
Dikte rijdek	150 mm, 2x 22 mm met lijven 15 mm dik	180 mm
Dikte fietsdek	8 mm met slijtlaag	8 mm met slijtlaag
Materiaal rijdek	VVK	Beton/asfalt
Materiaal fietsdek	Staal	hout

2.2 Opzet Metingen

Meetposities

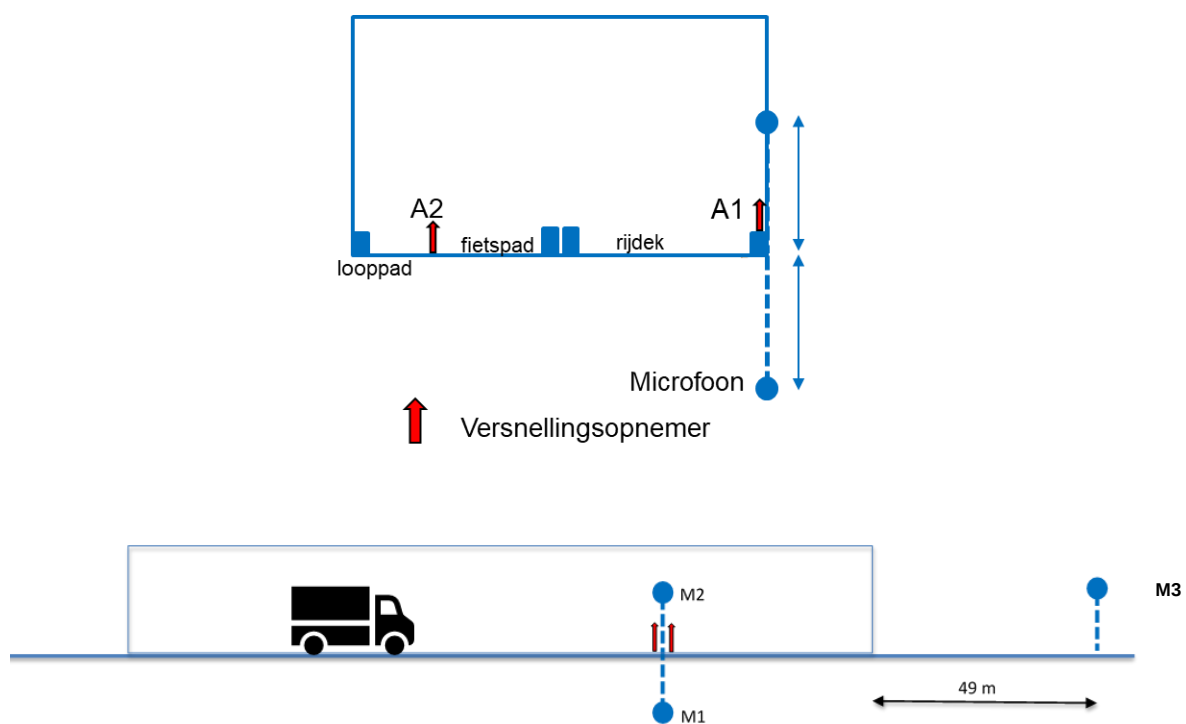
De geometrie van de meetposities volgt zover mogelijk het meetvoorschrift bruggen, echter de afstand van de microfoons tot de rijbaan verschilt, vanwege bereikbaarheid en veiligheid. Bij brug Locht staan de microfoons naast de rijbaan, bij brug Berg verder weg naast het fietspad.

De meetgeometrie bij beide bruggen staat in figuur 3 en 4 respectievelijk.

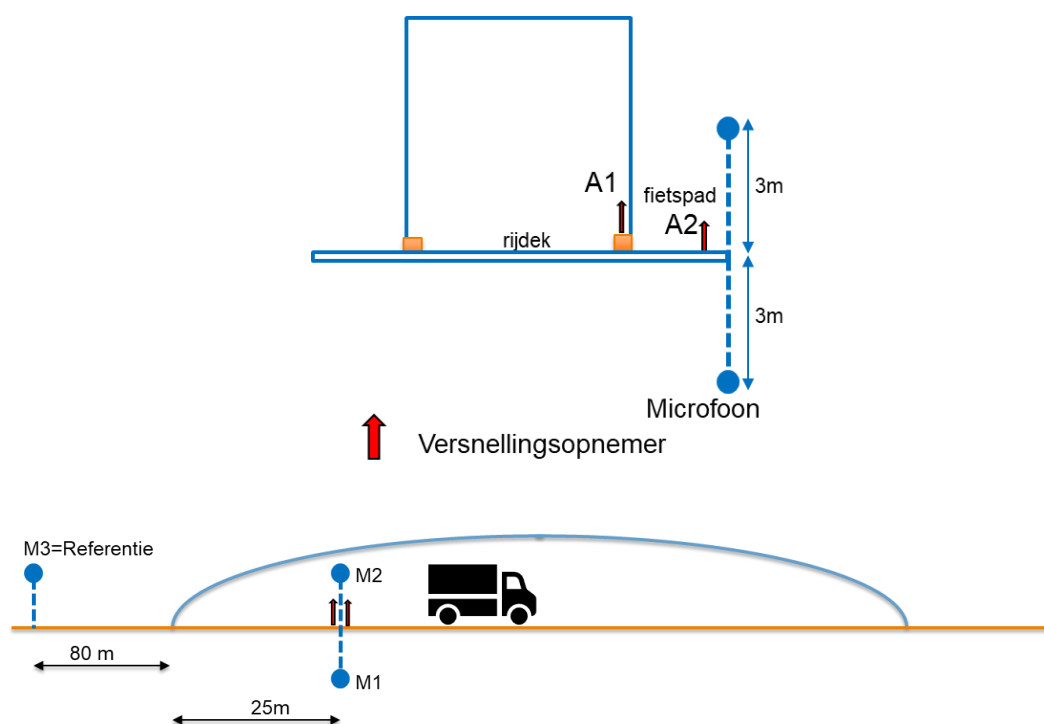
Meetprocedure

Een achttal passages van dezelfde vrachtwagen bij 40-50 km/h zijn geregistreerd op beide bruggen. Het SEL spectrum in een-derde octaafbanden is daaruit bepaald voor alle meetposities. Voor laagfrequent geluid is het gebied tussen 20 en 200 Hz van belang.

Het SEL spectrum is gebruikt omdat de vrachtwagenpassages aparte events zijn, in tegenstelling tot een continue verkeersstroom zoals dat bij grotere bruggen wordt gemeten.



Figuur 3 Meetposities bij brug Locht. Boven, dwarsdoorsnede Oost-West; onder, zij aanzicht Noord-Zuid.



Figuur 4 Meetposities bij brug Berg. Boven, dwarsdoorsnede West-Oost; onder, zij aanzicht Zuid-Noord.

In figuur 5 is de gebruikte vrachtwagen te zien die voor de passagemetingen gebruikt is. Deze weegt 18 ton.



Figuur 5 Gebruikte vrachtwagen op beide bruggen, boven: Locht, onder: Berg.

2.3 Meetresultaten

De SEL spectra zijn in figuur 6 weergegeven. Hier is te zien dat de brug Locht duidelijk hogere niveaus produceert, waarbij wel rekening moet worden gehouden dat de microfoons dichter op de rijbaan staan.

Voor de positie M1 onder de brug, waar de hoogste laagfrequente niveaus te verwachten zijn, is dit afstandsverschil van minder belang.

Ook al zou een berekende afstandscorrectie van 10 dB worden toegepast, voor een afstandsverhouding van 1m / 3m voor positie M2, dan nog produceert de brug Locht meer geluid, ook bij lage frequenties.

De gemeten versnellingen op de dekrand en op het fietspad tonen een groot verschil van 10-20 dB, waarbij de brug Locht veel sterker trilt. Dit is in figuur 7 te zien, waarbij de trillingen zijn weergegeven als snelheidsspectra L_v .

In bijlage C zijn de onzekerheidsmarges van zowel de gemeten geluiddruk en versnellingen van de passages weergegeven met één standaarddeviatie (65% onzekerheidsgebied). De spreiding is klein voor brug Locht (<1 dB) en gering voor brug Berg (orde grootte 2 tot 3 dB).

De indicatieve brugtoeslagen zijn ook bepaald door het verschil met de referentiemicrofoon te bepalen, getoond in figuur 8. Hier valt op:

- dat de brugtoeslagen C1 en C2 onder 125 Hz per brug op elkaar lijken; dit is te verklaren door de vergelijkbare afmetingen van de bruggen;
- dat de brugtoeslagen van de brug Locht een stuk hoger zijn dan brug Berg in het laagfrequente gebied onder 200 Hz.

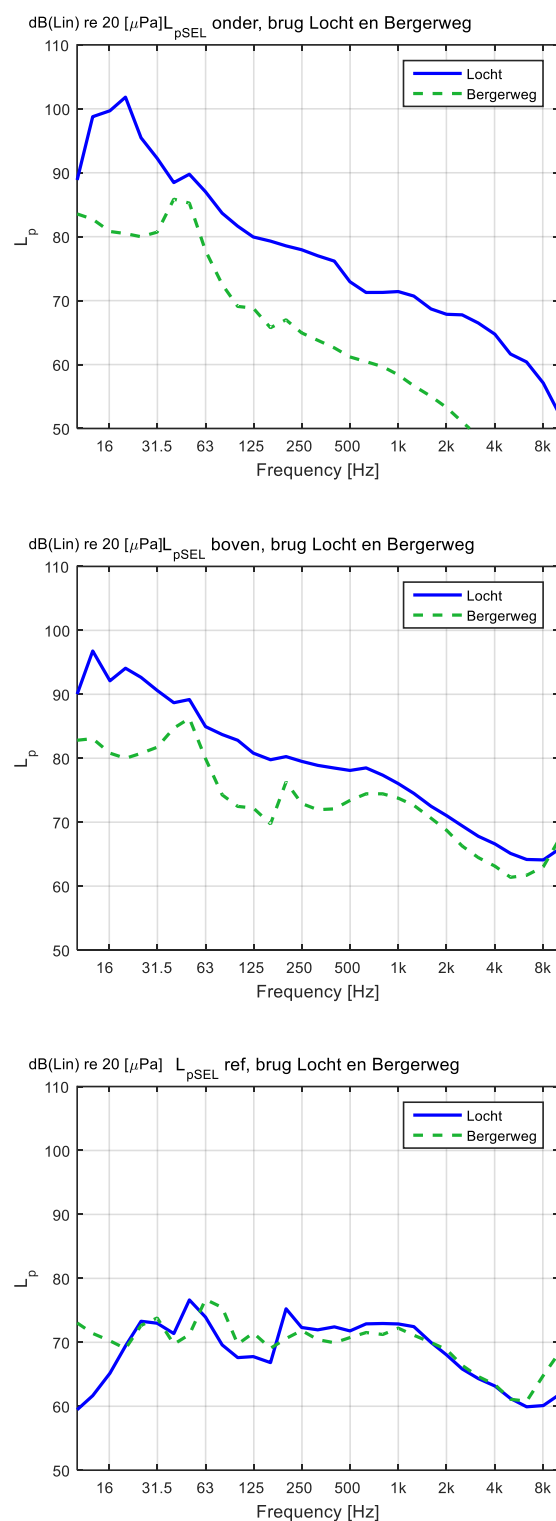
Deze resultaten zijn al een indicatie dat de brug Locht meer geluid afstraalt bij vergelijkbare excitatie.

Dit is te verwachten gezien de zwaardere staal-beton dekconstructie van brug Berg.

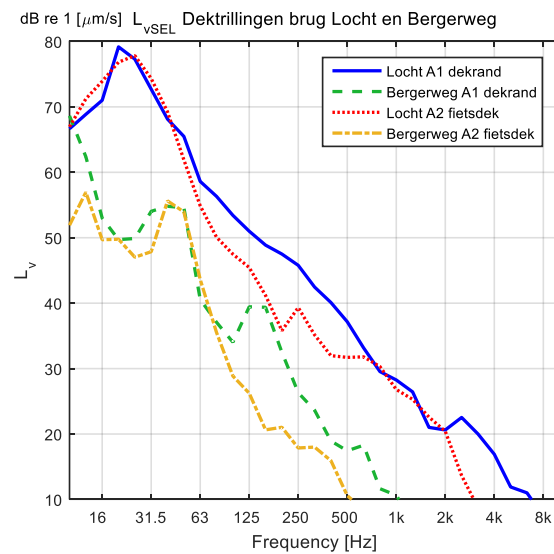
Waarneming

Tijdens de metingen is ook beluisterd wat opvalt. Het laagfrequente geluid is duidelijk hoorbaar bij de brug Locht, ook met breedbandig impact geluid ten gevolge van de voegen (3 op brug Locht, 2 op brug Berg). Vermoedelijk zou dit veel minder kunnen zijn indien de middenvoeg kleiner of afwezig zou zijn. Echter, ook de met rubber gevulde voegen aan de uiteinden zijn goed hoorbaar. Mogelijk speelt hier de stijfheid van het VVK dek een rol, dat bij belasting en ontlasting in- of uitveert. Als hierbij impacts door speling optreden, dan veroorzaakt dat ook excitatie van het dek.

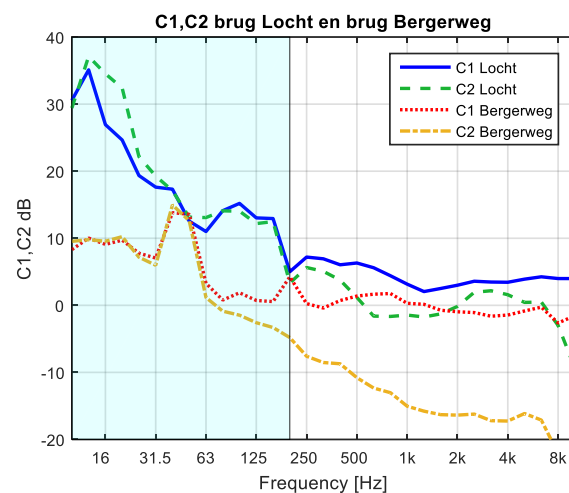
Bij brug Berg is geluid van het dek en voeggeluid nauwelijks hoorbaar. Daar zijn de voegen van stalen randen voorzien, in beton ingebed en met rubber gevuld. Daarnaast is het wegdek wat gladder dan bij brug Locht, hetgeen alleen voor band-wegdekgeluid bij hogere frequenties relevant is.



Figuur 6 SEL spectrum van meetposities M1 (onder de brug), M2 (boven de brug) en M3 (referentie).



Figuur 7 Trillingspectra (snelheidsniveau) van het dekrand en het fietsdek bij beide bruggen.



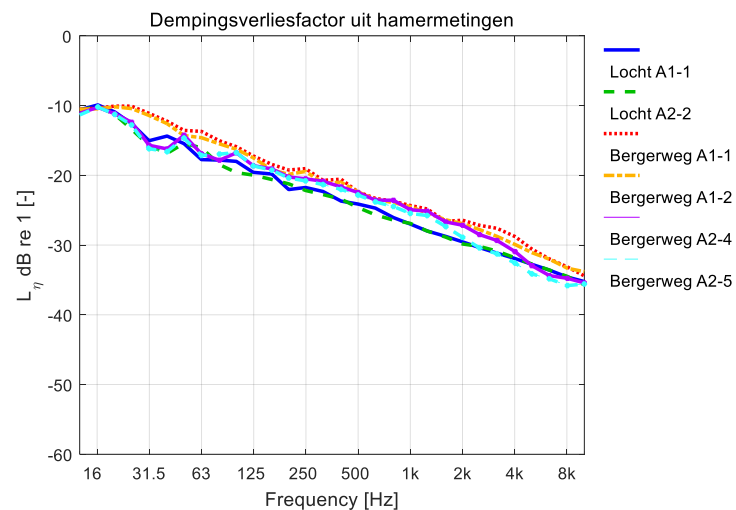
Figuur 8 Brugtoeslagen C1 en C2 voor de bruggen Locht en Berg, met links het relevante laagfrequente gebied aangegeven.

Damping van de constructie

De dempingsverliesfactor is indicatief gemeten aan de hand van de brugtrillingen, zowel uit hamer impactmetingen als uit voertuigpassages. Hierbij wordt per frequentieband gekeken naar de uitklinktijd van het responsiesignaal.

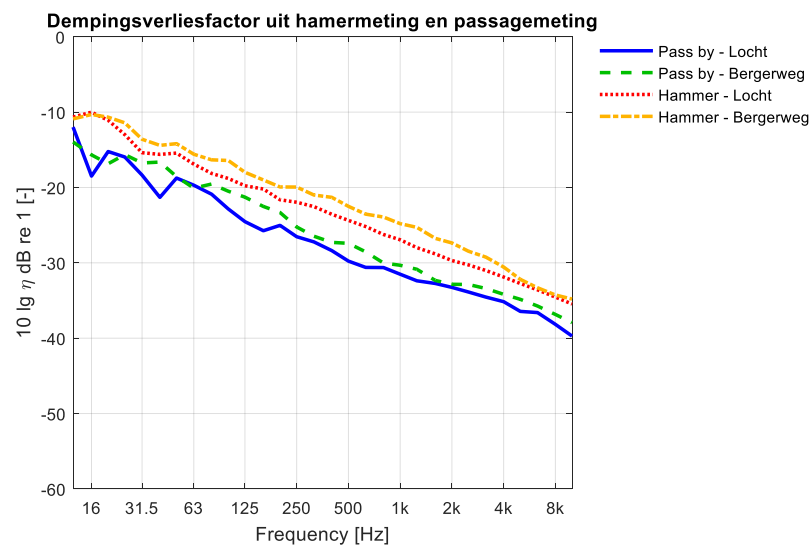
In figuur 9 staan de gemeten dempingsverliesfactoren voor de bruggen Locht en Berg, bepaald uit hamermetingen. Hierbij is met een hamer met teflon tip aangestoten naast het meetpunt. Meetpunt A1 was steeds op de rand naast het wegdek, punt A2 was op het fietspad. De getallen na de streep duiden de meetserie aan. Er is steeds over een tiental slagen gemiddeld. Voorbeelden van de spreiding in de metingen zijn in bijlage C opgenomen.

De resultaten laten zien dat de damping op de brug Berg enkele dB hoger is dan bij brug Locht.



Figuur 9 Gemeten dempingsverliesfactoren uit hamerslagen bij brug Locht en brug Berg. Punt A1 is op de brugrand naast de rijbaan, punt A2 op het fietspad.

De demping herleid uit passagetrillingen is in figuur 10 weergegeven, samen met de gemiddelde hamermetingen. Hierbij is over 8-10 passages gemiddeld. Ook hier is te zien dat brug Locht enkele dB lagere demping dan brug Berg heeft, waarbij de demping bepaald uit passages ca. 5 dB lager ligt dan uit hamer metingen. Dit is mogelijk te verklaren uit het verschil in excitatie, waarbij een voertuig met meerdere wielen de brug bewegend exciteert, terwijl een hamerstoot tot één positie en tijdstip beperkt is.



Figuur 10 Gemeten dempingsverliesfactoren uit hamermetingen en passagemetingen bij brug Locht en brug Berg.

3 Indicatieve berekeningen bestaande brug Urmond en nieuwe ontwerp

3.1 Bestaande en nieuwe brug Urmond

De bestaande brug Urmond heeft een constructie vergelijkbaar met de brug Berg, namelijk een betonnen dek ondersteund door langs- en dwarsliggers. De hoofdafmetingen van deze brug staan in tabel 2 en foto's van de brug in figuren 11 en 12.



Figuur 11 De bestaande brug Urmond, Mauritsweg (bron: Google maps, opname 2019).



Figuur 12 De bestaande brug Urmond, Mauritsweg, onderzijde (foto Rijkswaterstaat).

Tabel 2 Hoofdafmetingen van de bestaande brug Urmond en waar van toepassing, maten van het nieuwe ontwerp met VVK dek.

Bestaande brug Urmond / Mauritsweg	
Lengte	78,0 m
Breedte	11 m (nieuw: 12 m met bredere zijpaden)
Breedte rijdek	5 m (nieuw: 5,8 m)
Breedte fietsdek	2,45 m (nieuw: 3,0 m)
Hoogte boven water	7,7 m
Hoogte vakwerk	Begin en eind 5,29 m, midden 6,9 m
Breedte vakwerk	7,0 m
Dikte rijdek	150 mm beton met slijtlaag
Dikte fietsdek	8 mm stalen plaat met epoxy slijtlaag
Materiaal rijdek	Beton/asfalt (DAB)ondersteund door stalen langs- en dwarsdragers
Materiaal fietsdek	Beton op stalen consoles

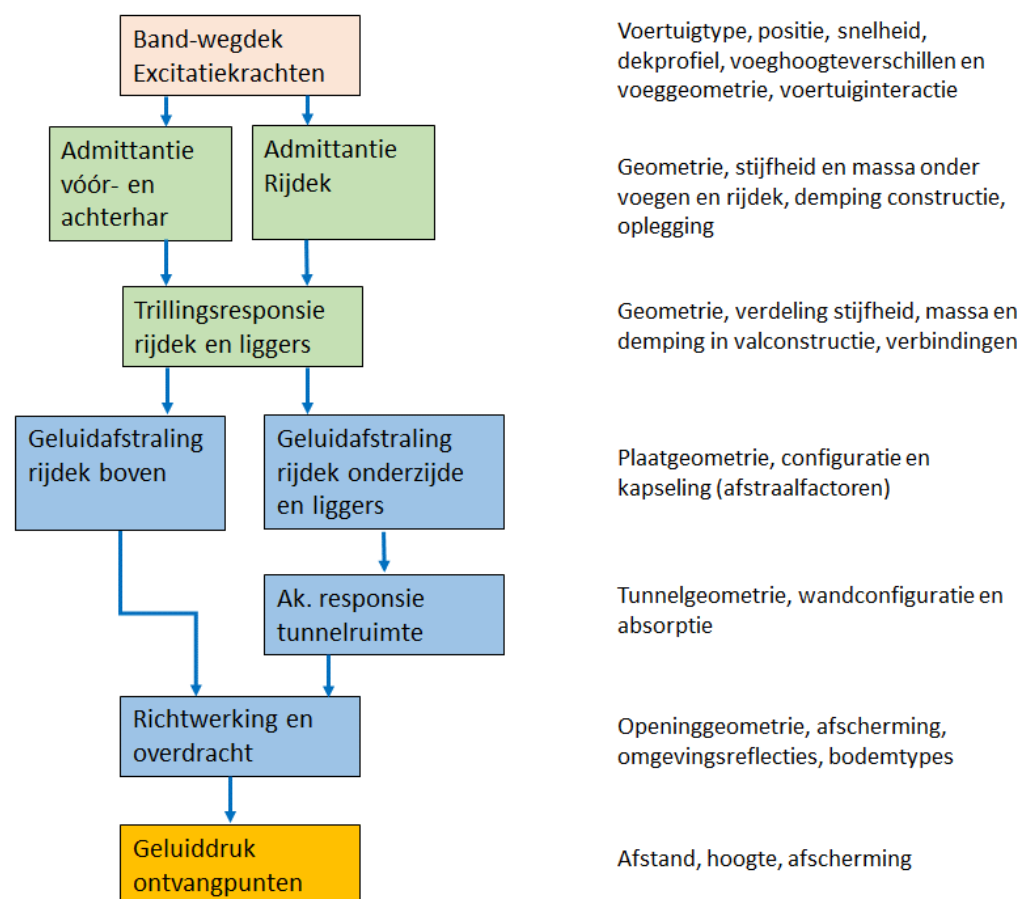
Voor de nieuwe brug is er nog geen definitief ontwerp en wordt uitgegaan van een gerenoveerde brug waarbij alleen het dek verschilt, namelijk dat het materiaal VVK is, opgelegd op de bestaande stalen dwars- en langsdragerprofielen.

Voor de dikte van het nieuwe VVK dek wordt uitgegaan een totale dikte van 150 mm, bestaande uit twee buitenhuiden van 22 mm dik, verbonden door lijven van 15 mm dik. De dekconstructie is middels kikkerplaten bevestigd aan de stalen profielen.

3.2 Akoestisch rekenmodel

Ten behoeve van deze quickscan wordt een eenvoudig statistisch model gehanteerd waarmee de belangrijkste effecten in eerste orde te kwantificeren zijn. Hierbij wordt gekeken naar het potentiële verschil in geluidafstraling ten gevolge van verandering in de vibro-akoestische overdracht, van excitatie naar geluid.

De beschrijving van dit model is opgenomen in bijlage A en schematisch weergegeven in figuur 13. Het model gaat uit van excitatie van het rijdek, de admittantie (bewegelijkheid) van het dek, trillingsresponsie van de constructie (rijdek en liggers), en de geluidafstraling van rijdek en liggers. Hierbij wordt verondersteld dat vanaf de eerste eigenfrequentie de dichtheid van hogere eigenfrequenties zodanig is dat middeling van de bovengenoemde grootheden toegestaan is.



Figuur 13 Schema hybride rekenmodel voor bruggeluid met rechts de invloedsfactoren.

Er wordt een vergelijking gemaakt tussen de huidige brugconstructie en een variant met een VVK dek die het betondek vervangt. Daarnaast wordt ook een stalen dek van 20mm dikte vergeleken.

De berekeningen zijn gemaakt met behulp van matlab routines die ook eerder zijn toegepast bij berekeningen aan onder andere de Wantijbrug en spoorbruggen, waar nodig aangepast voor deze specifieke constructie.

De berekende spectrale niveaus van de akoestische grootheden zijn weergegeven in bijlage B voor de beschouwde ontwerpvarianten.

Modellering

Voor deze analyse wordt verondersteld dat het rijdek met de ondersteunende profielen de belangrijkste geluidbronnen zijn. Het vakwerk speelt in het algemeen bij stalen bruggen nauwelijks een rol in de geluidafstraling. Bij deze brug is de lengte en doorvaarthoogte zodanig dat niet te verwachten is dat de akoestische resonantie onder de brug sterk bijdraagt zoals dat bij tunnels van beweegbare bruggen voorkomt.

De bestaande dekconstructie is akoestisch te beschouwen als een 180 mm dikke betonplaat, aan de randen eenvoudig opgelegd, en strekkend over de lengte van de brug. Deze plaat is ondersteund door I-profielen in lengterichting en dwarsrichting ter plaatse van de verticale vakwerkbalken. Voor de geluidberekening wordt een dekdeel beschouwd met de breedte van het rijdek opgelegd aan de zijranden en met de lengte van één dwarsdragerafstand.

Het VVK brugdek wordt akoestisch beschouwd als een equivalente plaatconstructie met stijfheid gelijkwaardig aan de daadwerkelijke sandwich constructie bestaande uit twee buitenhuiden en inwendige lijven.

Daarnaast wordt ervan uitgegaan dat het VVK dek aan de zijkanten even goed bevestigd is als het betonnen dek.

Materiaalgegevens

Voor de materialen worden de onderstaande gegevens in tabel 3 gebruikt. Deze zijn gebaseerd op literatuurbronnen [3] en voor de VVK zijn gegevens van de fabrikant gebruikt [4]. De hier vermelde dempingsverliesfactor is alleen van het materiaal, dat meestal lager is dan de constructiedemping ten gevolge van verbindingen. Deze waarden zijn indicatief en kunnen per materiaalsoort afwijken.

Tabel 3 Relevante materiaalgegevens voor de brugcomponenten. De dempingsverliesfactoren (lineair) zijn alleen van het materiaal zonder effecten van verbindingen.

	E-modulus [GPa]	Poisson constante [-]	Soortelijke massa [kg/m ³]	Dempings- verliesfactor [-]
Staal	210	0,31	7850	10 ⁻⁴
Beton	26	0,2	2400	6.10 ⁻³
VVK	Dekhuiden: 22	0,24	1800	10 ⁻²
Glaspolyester	Deklijven: 10,3			

Dek- en profielgeometrie

De afmetingen van dekken en steunprofielen die in de analyse worden meegenomen staan in tabel 4. Deze zijn gebaseerd op tekeningen en profielinformatie van Rijkswaterstaat. Veel van de steunprofielen zijn geklonken. Een deel heeft ook lokaal verhoogde dikte middels extra lijfplaten of toegevoegde plaatdelen op de flenzen.

Tabel 4 Afmetingen van plaatdelen. De dwarsdragers hebben een verlopende hoogte en lijfplaten.

	Aantal per sectie	Lijfhoogte [mm]	Lengte per sectie [mm]	Breedte [mm]	Lijfdikte	Totale oppervlak eenzijdig [m2]
Hoofdliggers UNP400	4	400	6700	110	14	10,72
Dwarsdragers (speciale I)	2	800	7000	100	10	11,2
Langsliggers INP380	6	380	6700	149	13,7	15,27
Rijdek:	1		6700	5670		37,98
Beton					180	
VVK					150	
Staal					20	
Fietsdek	2		6700	2450 / 3000	8	32,83

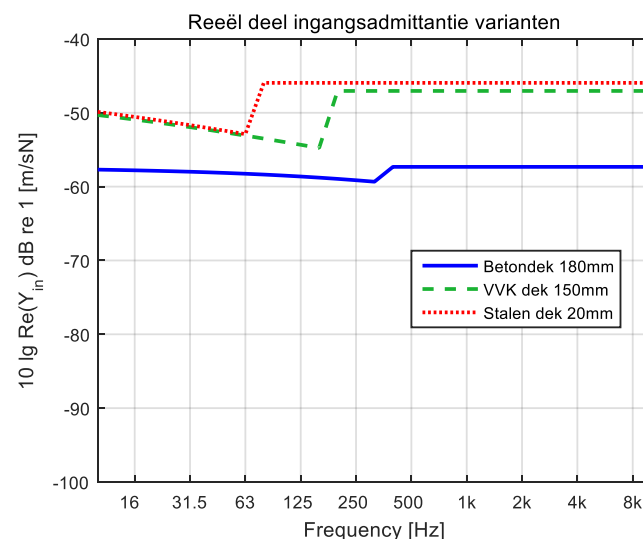
3.3 Akoestische verschillen

Excitatie

Verondersteld wordt dat de excitatie gelijk blijft voor de oude en de nieuwe brug. De excitatie ontstaat door het bewegende contact tussen banden en brugdek, afkomstig van meerdere wielen verdeeld over verschillende posities.

Ingangsadmittantie

De ingangsadmittantie is de verhouding van trillingssnelheid per eenheid kracht, en is te beschouwen als de bewegelijkheid van de constructie per frequentieband. Het reële deel van de ingangsadmittantie is bepalend voor het ingaande akoestische vermogen in het brugdek. Dit verschilt voor de oude en de nieuwe brug. In figuur 14 staat het reële deel van de ingangsadmittantie berekend voor een equivalente plaat (inclusief de langsbalken), voor het 180 mm betondek, het VVK dek (22+22+spacers) en ter vergelijking een stalen dek van 20 mm.



Figuur 14 Reëel deel van de ingangsadmittantie van het brugdek voor beton, VVK en stalen dek inclusief 6 stalen langsliggers.

Trillingsresponsie

De trillingsresponsie van de brug hangt af van de verdeling van massa en stijfheid van de brug, met name het dek, en van de demping en de overdracht van dek naar de verbonden profielen. Naast de demping is hier ook de wijze en mate van verbinding van belang.

Demping

De demping is afhankelijk van het toegepaste materiaal, maar ook van de verbindingen tussen het dek en de onderliggende steunconstructie. De onderliggende staalconstructie is geklonken en lokaal van toegevoegde plaatdelen voorzien waardoor een relatief hoge demping te verwachten is. De demping van het dek is echter het belangrijkste omdat daar de trillingsenergie de constructie ingaat.

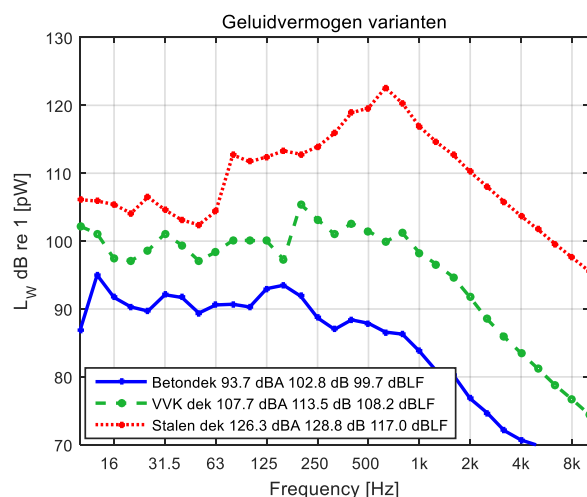
Uit de metingen blijkt (zie figuren 9 en 10) dat de demping bij brug Locht enkele dB lager is dan brug Berg. Dit zal evenredig meer geluid opleveren; het is echter geen groot verschil. De gemeten demping wordt ook sterk bepaald door de verbindingen en contactvlakken in de constructie.

Afstraalfactor

De geluidafstraling hangt ook af van de efficiëntie van afstraling, vervat in de afstraalfactor. Deze hangt af van de geometrie en het materieel van het rijdek alsmede de stijfheid van de ondersteunende constructie. Met name het rijdek verschilt bij deze varianten, waardoor ook een verschil in geluidemissie ontstaat.

Afgestraald geluidvermogen

Het afgestraalde geluidvermogen voor de drie varianten staat in figuur 15. Hierin is te zien dat het VVK dek ca. 8 dB luider uitkomt dan het betondek voor het laagfrequente gebied onder 200 Hz. Het stalen dek is weer circa 9 dB hoger.



Figuur 15 Vergelijking van berekende geluidvermogen voor de varianten betondek, VVK dek en stalen dek. dBA is het A-gewogen niveau, dBLin het ongewogen niveau, dBLF het ongewogen energetisch niveau voor alleen het laagfrequente gebied onder 200 Hz.

4 Conclusies

In deze quickscan studie is een eerste inschatting gemaakt van het effect van een vezelversterkte kunststof (VVK) rijdek op een verkeersbrug in plaats van beton. Dit is onderzocht voor de brug Urmond (Mauritsweg) over het Julianakanaal. Daarbij is het volgende geanalyseerd:

- gemeten geluidemissie en demping bij twee andere vergelijkbare bruggen, één met VVK dek en één met betondek;
- indicatieve berekening van het te verwachten verschil in geluidemissie voor de brug Urmond/Mauritsweg bij toepassing van een VVK dek.

De focus lag vooral op lage frequenties tussen 20 en 200 Hz.

Uit de vergelijkende meting aan de bruggen Locht bij Kerkrade met VVK dek, en de brug Berg in Urmond kwam naar voren dat zoals te verwachten, de brug Berg met betonnen dek relatief stil was. De brug Locht is luider, ten gevolge van het lichtere dek dat harder trilt maar ook door de hogere excitatie van de voegen, waaronder die in het midden van het dek. Daarnaast bleek uit de metingen dat de brug Locht een paar dB lager gedempt is dan de brug Berg. De brugtoeslag van de brug Locht is bij lage frequenties (≤ 200 Hz) ca 10 tot 20 dB hoger dan die van de brug Berg.

Uit de indicatieve berekeningen aan de brug Urmond kwam naar voren dat een VVK dek voor de lage frequenties 8 dB luider zou kunnen zijn dan het conventionele betondek, bij dezelfde excitatie, dus zonder het effect van voegen zoals bij brug Locht.

In hoeverre dit voor de omgeving relevant is, hangt af van de nabijheid van woningen en de hoeveelheid en samenstelling van het verkeer.

Bij toepassing op de brug Urmond zou het VVK dek nog geoptimaliseerd kunnen worden om de geluidemissie te reduceren. Daarbij zijn aandachtspunten: vermijden of verbeteren van voegen, de inwendige verstijving en vulling, de demping en de wijze van bevestiging. Dit zal naar verwachting enige R&D inspanning vereisen, mede om aan overige ontwerpisen te voldoen.

Referenties

- [1] M.G. Dittrich, A. Berkhoff: Inventarisatie en werkplan geluidreducerende maatregelen stalen verkeersbruggen, TNO rapport TNO 2019 R11877, maart 2020.
- [2] M.G. Dittrich, C. Bosschaart, E. Brouns, A. Berkhoff: Geluidreductie analyse voor het ontwerp van de nieuwe Wantijbrug N3, TNO rapport TNO 2017 R10443, april 2017.
- [3] L. Cremer, M. Heckl, B. Peterson: Structure-borne Noise, Springer-Verlag, 2005.
- [4] M. Teeuw, M. Velkamp: Ontwerprapport Brug Urmond, Case composiet brugdek, Fibercore document P19-063-OWB-010-BER-VK-Ontwerprapport_r1.0, 13-12-2019.
- [5] Ontwerptekeningen brug Urmond, Archief Rijkswaterstaat.

A Modelling

Voor de modellering van het geluid van stalen bruggen worden statistische of numerieke modellen toegepast. Tot op heden zijn bekende principes voor de berekening van constructiegeluid en geluidafstraling gebruikt. Deze modellering dient echter nader te worden ingevuld voor stalen verkeersbruggen wegens hun bijzonderheden: de wijze van excitatie, het type constructie en de akoestische versterking door de ruimte onder de brug. De modellering uit het rapport over de parametrische studie van de Wantijbrug wordt hieronder beschreven.

De meeste grootheden zijn magnitudo in één derde octaafbanden, met uitzondering van massa, afmetingen en geluidssnelheid.

Het ingaande vermogen P_{in} hangt af van de aanstootkracht F_{in} en het reëel deel de ingangsadmittantie Y_{in} :

$$P_{in} = F_{in}^2 \cdot \text{Re} \{ Y_{in} \} \quad (1)$$

Het ingaande vermogen P_{in} wordt hoofdzakelijk omgezet in gedissipeerd vermogen van trillende platen P_{diss} :

$$P_{in} = \sum_{i=1}^n P_{diss,i} = \sum_{i=1}^n \eta_i \omega m_{pl,i} S_i \overline{v_i^2} \quad (2)$$

waarbij i = index van de plaat, η = dempingsverliesfactor, ω = hoekfrequentie, m_{pl} = massa per eenheid oppervlak, S = oppervlak en v^2 = trillingssnelheid gemiddeld over het oppervlak.

Voor goed gekoppelde platen wordt verondersteld dat de gemiddelde trillingsniveaus zich verhouden als het reële deel van de ingangsadmittanties en daarmee omgekeerd met het kwadraat van de plaatdiktes:

$$\frac{\overline{v_i^2}}{\overline{v_j^2}} \approx \frac{\text{Re}(Y_{in,i})}{\text{Re}(Y_{in,j})} = \frac{h_j^2}{h_i^2} \quad (3)$$

Voor de platen apart is een trillingsoverdrachtfunctie H_v^2 te berekenen die de verhouding tussen ingaande trillingssnelheid en oppervlak gemiddelde trillingssnelheid geeft:

$$H_v^2 = \frac{\overline{v_i^2}}{\overline{v_{in}^2}} \quad (4)$$

Deze neemt voor platen in het algemeen toe bij de eerste eigenfrequentie en daalt geleidelijk, afhankelijk van de demping.

Het geluidvermogen per plaat W_i wordt bepaald uit de afstraalfactor σ_i , de gemiddelde plaattrilling v_i^2 , het oppervlak S_i en de akoestische impedantie ρc :

$$W_i = \sigma_i \rho c S_i \overline{v_i^2} \quad (5)$$

en het totale geluidvermogen L_{Wtot} is de energetische som over alle platen:

$$L_{Wtot} = \sum_{i=1}^n 10^{L_{W,i}/10} \quad (6)$$

Als het gaat om maatregelen zoals verstijving van de constructie waarbij de afstraalfactor niet wordt beïnvloed, dan is de geluidreductie uit de afname van het ingaande vermogen te bepalen volgens

$$\Delta L_W = \Delta P_{in} = \Delta \text{Re}(Y_{in}) = \Delta \text{Re}\left(\frac{1}{Z_{in}}\right) \quad (7)$$

waarbij Z_{in} de complexe ingangsimpedantie is, waarvoor basis formules beschikbaar zijn onder andere in het boek 'Structure-borne Sound' van Cremer en Heckl, en alle grootheden in frequentiebanden zijn gegeven.

Voor verstijfde platen geldt dat gerekend kan worden met de equivalente buigstijfheid voor de bepaling van de trillingsoverdracht H_v^2 waarbij het frequentiegebied wordt opgedeeld in trillingen van de hele plaat met verstijvers, en trillingen van plaatdelen met een eigen, hogere eigenfrequentie.

Verstijvingen op platen reduceren meestal het trillingsniveau, echter kan de afstraalfactor worden vergroot ten gevolge van een langere randlengte.

Voor de damping geldt dat deze meestal verlagend werkt op de plaattrillingen, indien de damping werkelijk wordt verhoogd. Damping werkt het beste vanaf de eerste eigenfrequentie van platen en geeft een reductie in trillingsniveau omgekeerd evenredig met de verliesfactor.

Voor sandwichlagen zijn formules beschikbaar waarmee een dempingscurve kan worden bepaald in het boek van Cremer en Heckl. Randvoorwaarde voor een goede werking is dat de tussenlaag een voldoende hoge inwendige damping heeft en dat de toplaag voor voldoende afschuiving in de tussenlaag zorgt.

Voor de excitatie van verkeersbruggen wordt uitgegaan van de volgende karakteristieke locaties op het brugdek:

- Boven het voorhar en achterhar, waar de piek van het op- en afrijden optreedt, maar ook waar eventuele stoten vanuit de oplegging worden ingeleid.
- Op het rijdek op onverstijfde delen.
- Op het rijdek op verstijfde posities zoals boven een dwarsdrager, boven een hoofdligger of boven een kruising van beide.

In de berekeningen wordt uitgegaan van a) voor de excitatie van het op- en afrijden, voor het overrijden van de hele brug wordt uitgegaan van een combinatie van a), b) en c). Dit komt tot uiting in de keuze voor de ingangsadmittantie, die wordt bepaald uit de som van de relevante ingangsimpedanties.

Het ingaande vermogen wordt het sterkste bepaald door de ingangsadmittantie in een straal van een kwart golflengte rond het excitatiepunt. De golflengte is afhankelijk van de lokale buigstijfheid, lokale massa en de frequentie, waardoor de invloed van de verschillende brugdelen met de frequentie varieert. In het algemeen betekent dit dat bij lage frequentie een groter deel van de constructie mede bepalend is voor de ingaande trillingsenergie. Een groter deel van de constructie is bepalend voor de geluidafstraling.

Het geluiddrukkniveau L_p op afstand r van de brug is te berekenen met

$$L_p = 10 \lg (W_{\text{tot,lower}}/2) - 20 \lg (r) - 11 - A + D \quad (8)$$

met

$L_{W_{\text{tot,lower}}} =$ geluidvermogen afkomstig van de onderzijde van de brug,

$A =$ overdrachtsverzwakking door grondeffecten, luchtabsorptie en eventuele reflecties,

$D =$ richtingskarakteristiek van het geluidveld van de onderzijde van de brug.

De brug is bij benadering een monopool voor lage frequenties maar wordt met toenemende frequentie meer op de dwarsas van de brug gericht, als de golflengte van het geluid kleiner wordt dan de dimensies van de doorvaarthoogte en -breedte.

B Rekenresultaten voor 3 brugvarianten

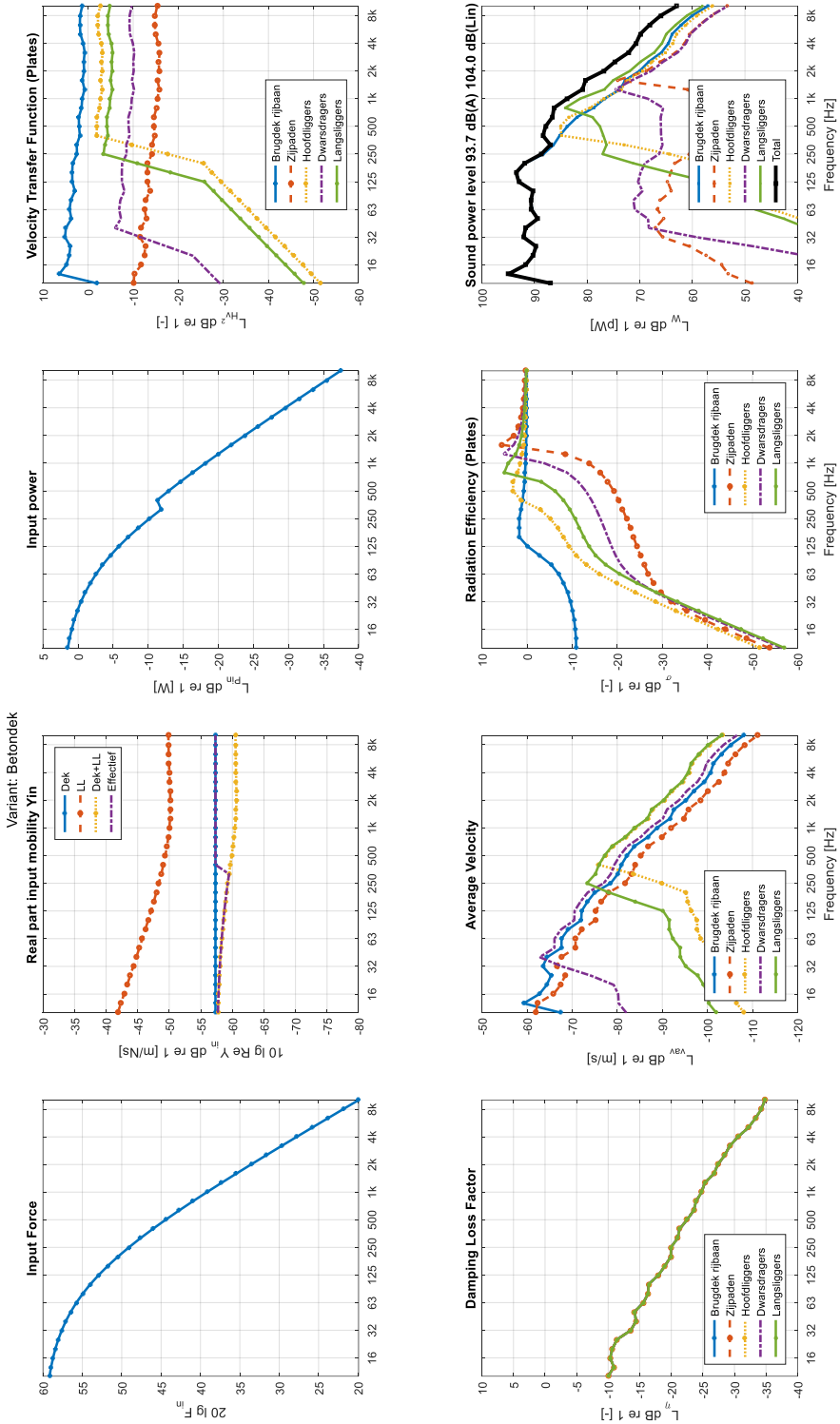
De rekenresultaten van drie varianten voor de brug Urmond met betondek, VVK dek en ter vergelijking een 20mm stalen dek, staan in onderstaande figuren.

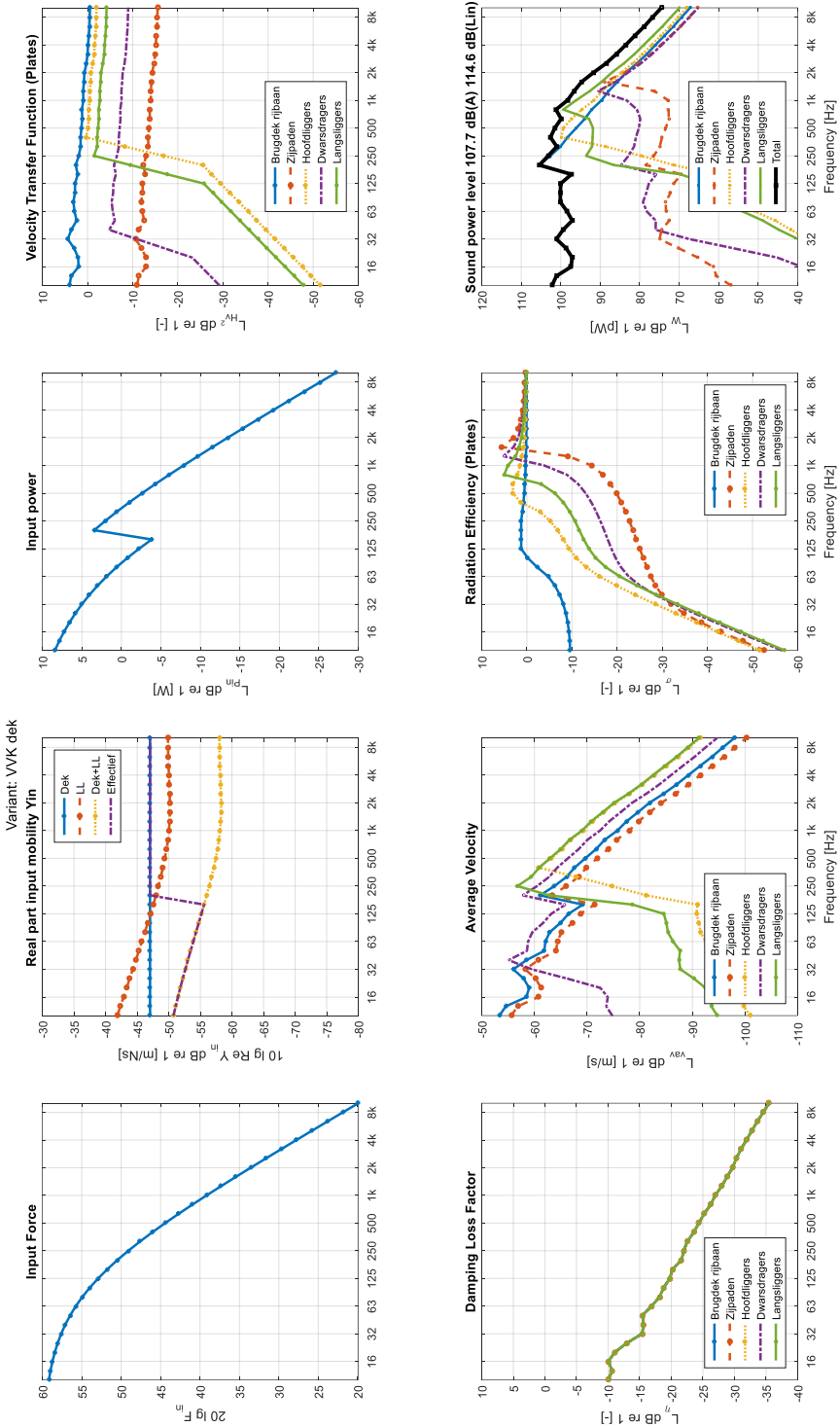
De akoestische spectra per component zijn:

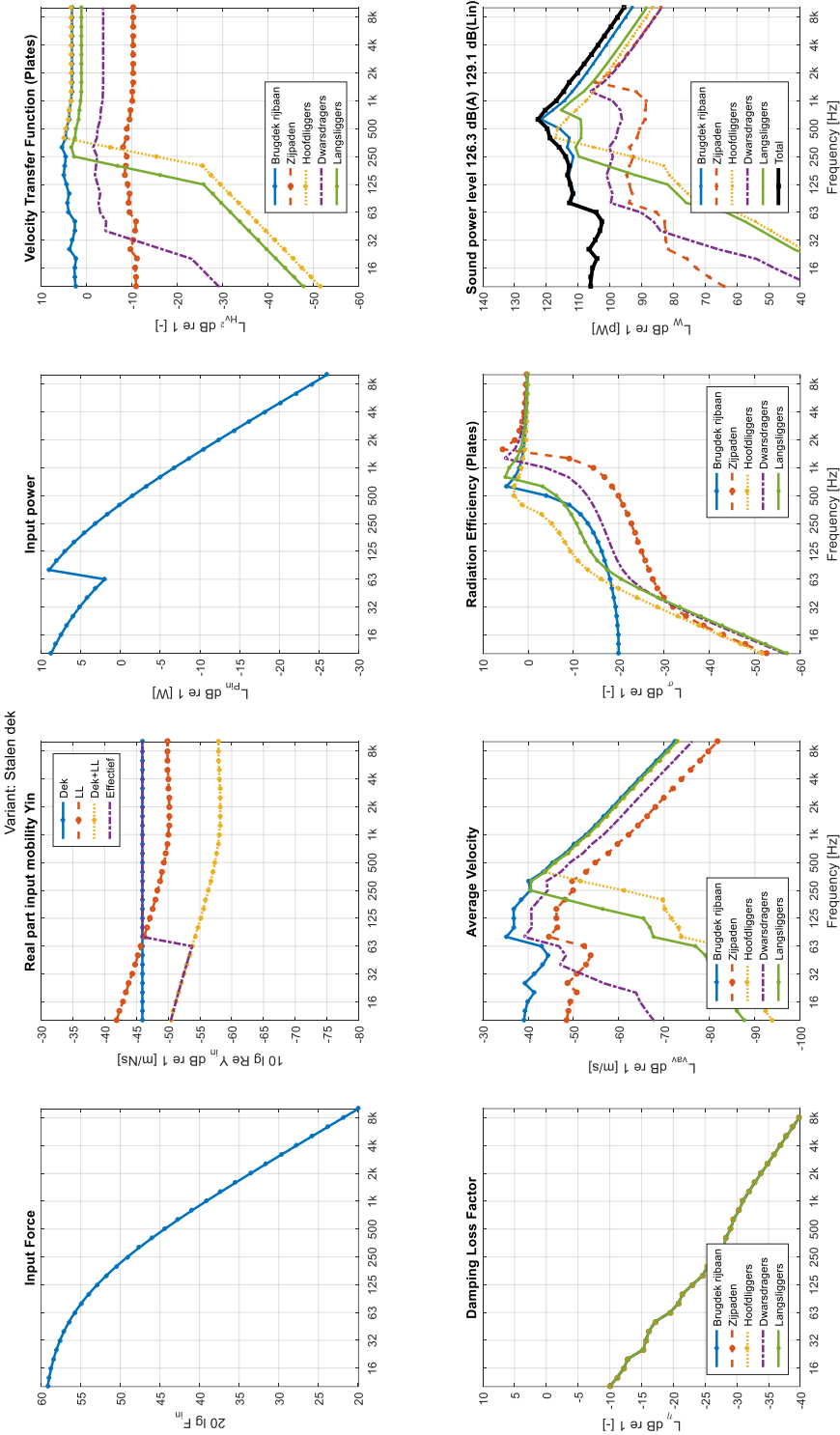
- de excitatiekracht F_{in}
- reëel deel van de ingangsadmittantie $\text{Re}(Y_{in})$
- ingaand akoestisch vermogen P_{in}
- overdracht trillingssnelheden (gemiddelde snelheid / ingangssnelheid) H_v
- dempingsverliesfactor η
- gemiddelde trillingssnelheid v_{av}
- afstraalfactor σ
- geluidvermogen W

Deze zijn steeds als niveau weergegeven, dus als $L_x = 10 \lg x/x_0$ of $L_x = 20 \lg x/x_0$ van de betreffende grootheid x , waarbij x_0 de referentiewaarde voorstelt.

Het geluidvermogen is een brongrootheid voor geluid. Resulterende geluiddruk niveaus hangen van de waarneempositie af en zijn minstens 10 dB lager.

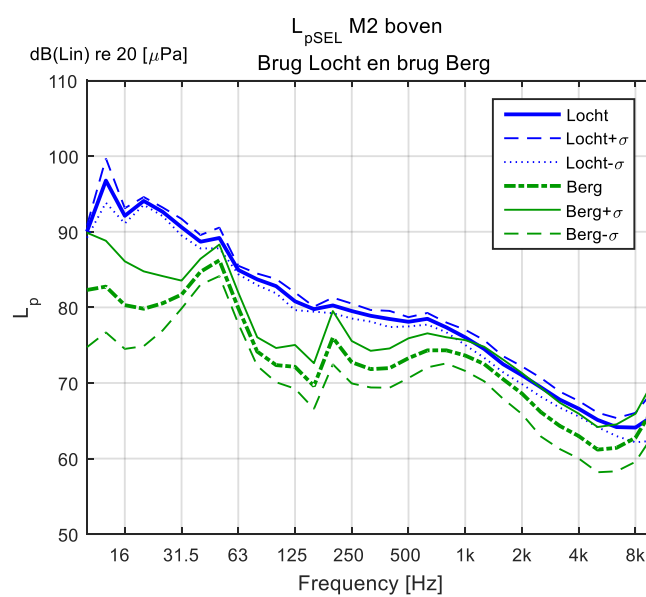
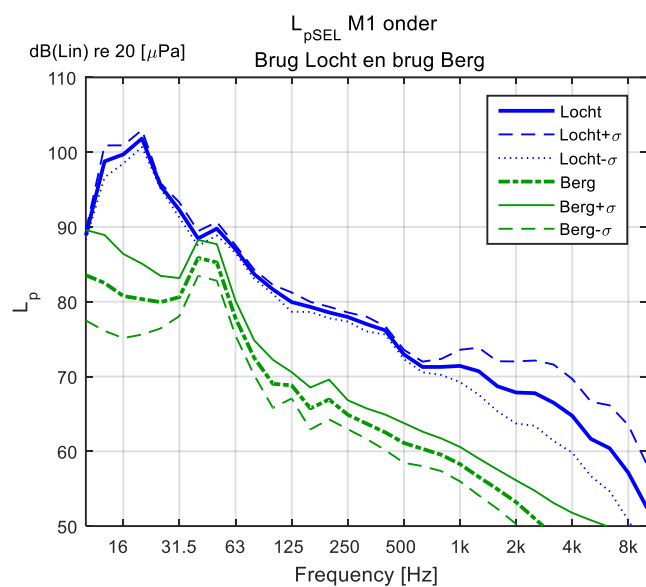


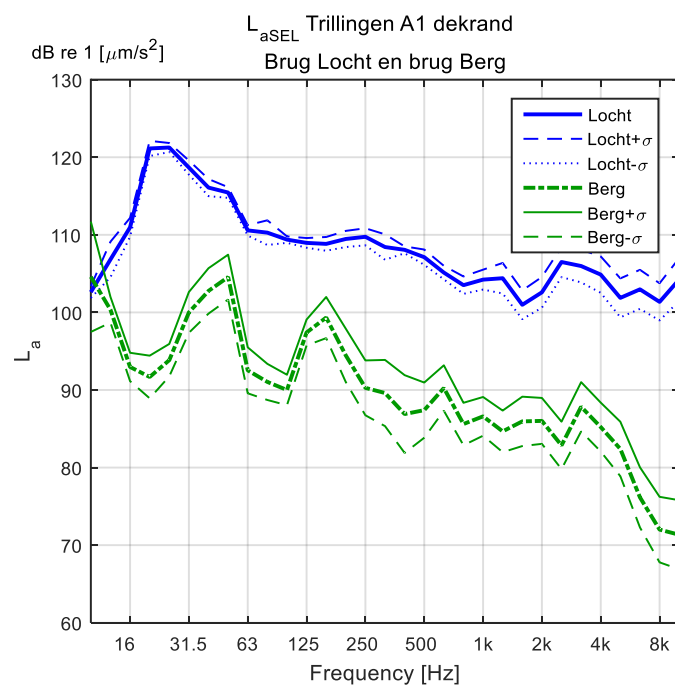
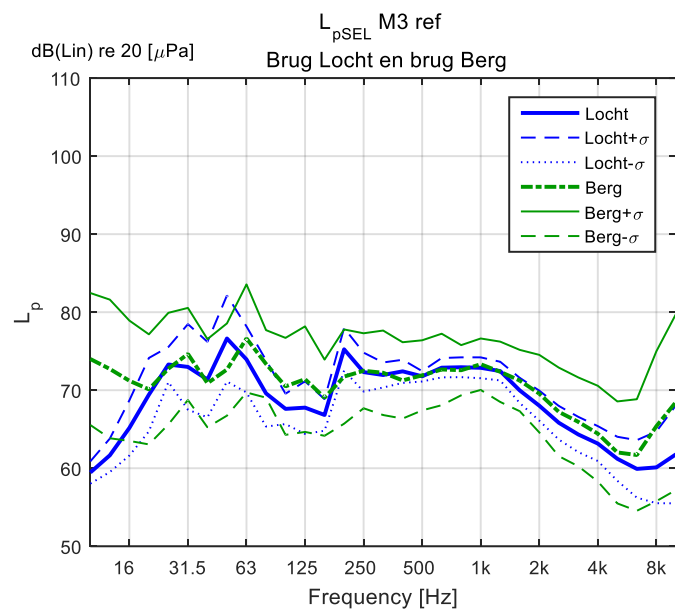


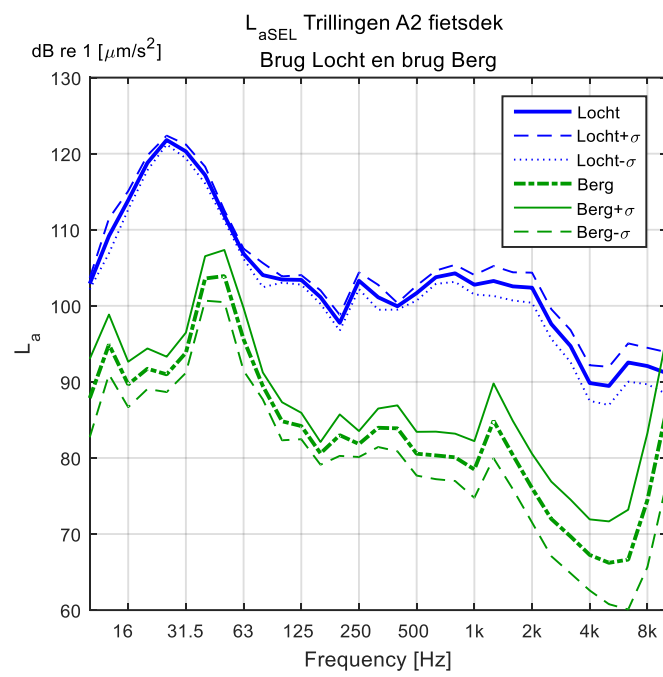


C Spreiding in de metingen en spectra tabellen

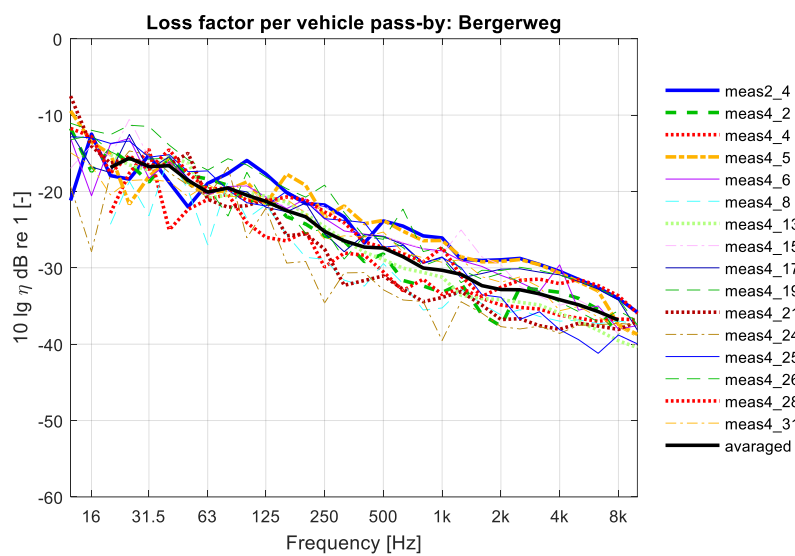
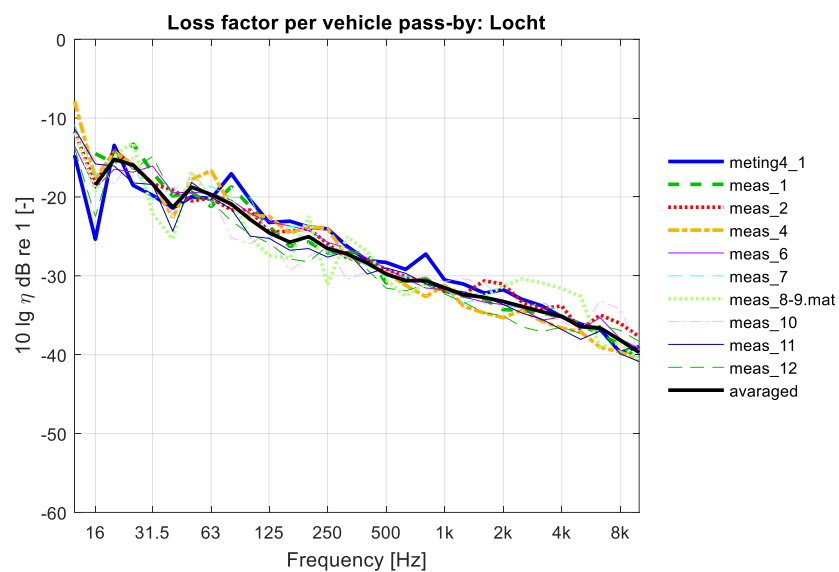
Onderstaande spectra geven de spreiding weer in de gemeten geluid- en trillingsniveaus met plusminus één standaarddeviatie.



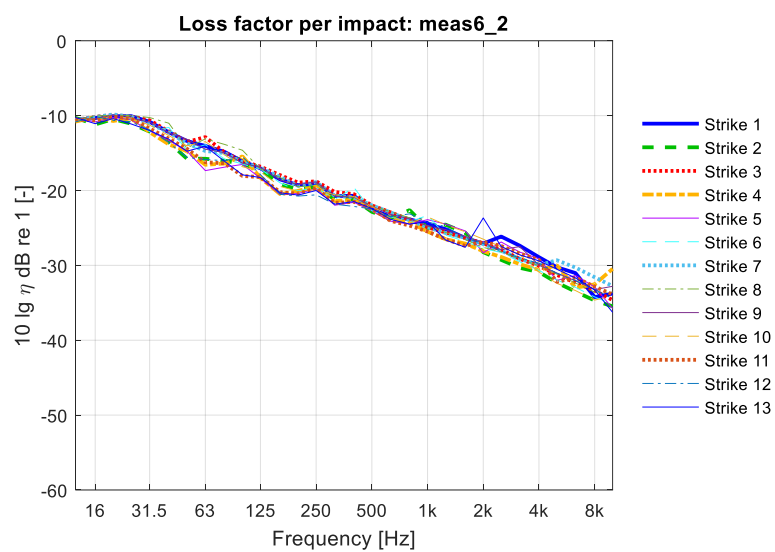
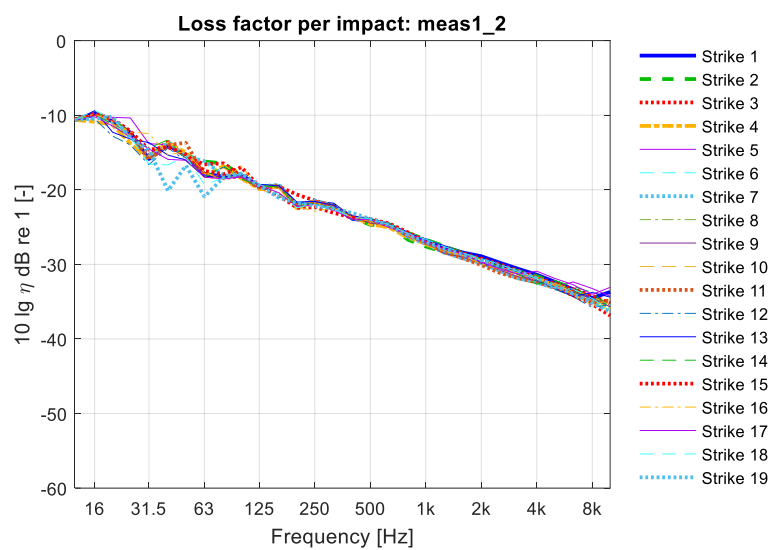




Spreading in dempingsmetingen, gemeten met voertuigpassages.
Boven: brug Locht, onder: brug Berg.



Spreading in dempingsmetingen, gemeten met hamerslagen.
Boven: brug Locht, onder: brug Berg.



Gemiddelde spectra in tabellen: Geluidrukniveau in dB re 20 µPa
en versnellingsniveau in dB re 1 µm/s²

	Brug Locht					Brug Berg				
fc [Hz]	M1	M2	M3	A1	A2	M1	M2	M3	A1	A2
10	88,9	90,0	59,5	102,6	102,9	83,5	82,3	74,0	104,6	87,9
12,5	98,8	96,8	61,7	106,8	109,2	82,5	82,7	72,7	100,3	94,9
16	99,7	92,1	65,2	111,0	113,9	80,8	80,3	71,2	93,0	89,7
20	101,8	94,1	69,4	121,1	118,8	80,3	79,8	70,1	91,7	91,7
25	95,5	92,6	73,3	121,3	121,8	79,9	80,5	72,8	93,8	91,0
32	92,3	90,6	73,0	118,7	120,3	80,6	81,7	74,6	100,0	93,8
40	88,5	88,7	71,4	116,1	117,2	85,9	84,7	70,9	102,8	103,6
50	89,8	89,2	76,6	115,5	111,9	85,3	86,2	72,7	104,6	103,9
63	87,0	84,9	73,9	110,6	106,8	77,8	79,9	76,6	92,5	95,6
80	83,7	83,7	69,6	110,3	104,0	72,5	74,2	73,4	91,0	89,5
100	81,6	82,8	67,6	109,4	103,5	69,0	72,4	70,5	90,0	84,8
125	80,0	80,8	67,8	109,0	103,4	68,8	72,1	71,4	97,4	84,2
160	79,3	79,8	66,8	108,8	101,1	65,7	69,6	69,0	99,3	80,6
200	78,6	80,3	75,2	109,5	97,8	66,9	76,0	71,7	94,5	83,0
250	78,0	79,5	72,3	109,7	103,3	64,9	72,7	72,5	90,3	81,8
316	77,0	78,9	71,9	108,4	101,1	63,7	71,8	72,2	89,6	84,0
400	76,2	78,5	72,4	108,1	99,9	62,5	72,0	71,3	86,9	83,9
500	73,0	78,1	71,8	107,1	101,7	61,1	73,3	71,9	87,4	80,6
630	71,3	78,5	72,9	105,1	103,8	60,3	74,3	72,7	90,3	80,3
800	71,3	77,4	72,9	103,5	104,3	59,5	74,3	72,6	85,6	80,1
1000	71,4	76,0	72,9	104,2	102,8	58,3	73,6	73,3	86,6	78,5
1250	70,7	74,5	72,4	104,4	103,3	56,6	72,5	72,4	84,7	84,9
1600	68,7	72,5	70,0	101,0	102,6	54,9	70,5	71,2	86,0	80,4
2000	67,9	71,0	68,0	102,6	102,4	53,2	68,6	69,6	86,0	76,0
2500	67,8	69,4	65,8	106,5	97,6	51,0	66,1	67,2	82,9	72,0
3150	66,5	67,8	64,3	106,0	94,7	48,7	64,3	65,9	87,8	69,7
4000	64,7	66,6	63,2	104,9	89,8	47,2	63,0	64,4	85,2	67,3
5000	61,6	65,1	61,2	101,9	89,5	45,9	61,2	62,0	82,4	66,2
6300	60,4	64,2	59,9	103,0	92,5	44,6	61,4	61,7	76,2	66,6
8000	57,1	64,1	60,1	101,4	92,1	43,3	62,8	65,4	72,0	74,5
10000	52,4	65,8	61,8	104,2	91,2	42,5	66,9	68,5	71,3	86,4

Spectra van de gemiddelde dempingsniveaus in dB.

fc [Hz]	Hamer Locht	Hamer Berg	Pass-by Locht	Pass-by Berg
12,5	-10,7	-10,9	-12,0	-14,0
16	-10,0	-10,3	-18,5	-15,7
20	-11,1	-10,7	-15,2	-16,9
25	-13,0	-11,4	-16,0	-15,6
32	-15,4	-13,6	-18,4	-16,7
40	-15,6	-14,4	-21,3	-16,6
50	-15,4	-14,2	-18,7	-18,6
63	-16,9	-15,6	-19,7	-20,1
80	-18,1	-16,3	-20,9	-19,5
100	-18,8	-16,4	-22,8	-20,5
125	-19,8	-18,0	-24,5	-21,3
160	-20,2	-19,0	-25,7	-22,5
200	-21,6	-19,9	-25,0	-23,3
250	-22,0	-19,9	-26,5	-25,2
316	-22,5	-21,0	-27,2	-26,5
400	-23,6	-21,3	-28,4	-27,3
500	-24,4	-22,5	-29,8	-27,4
630	-25,2	-23,5	-30,6	-28,5
800	-26,2	-23,9	-30,6	-30,0
1000	-26,9	-24,8	-31,5	-30,3
1250	-28,0	-25,3	-32,4	-30,9
1600	-28,8	-26,8	-32,7	-32,3
2000	-29,7	-27,4	-33,3	-32,8
2500	-30,3	-28,5	-33,9	-32,9
3150	-31,0	-29,2	-34,5	-33,4
4000	-31,9	-30,6	-35,2	-34,2
5000	-32,7	-32,2	-36,4	-34,8
6300	-33,6	-33,3	-36,6	-35,7
8000	-34,5	-34,3	-38,2	-36,8
10000	-35,5	-34,8	-39,7	-37,9