
Karakteriseren van wegdekken met een eenvoudig systeem van sensoren

AFSTUDEERVERSLAG

VOOR

TECHNISCHE NATUURKUNDE
DE HAAGSE HOGESCHOOL, DELFT

UITGEVOERD BIJ

DGMR

Auteur:

K.A. VAN DER RIET

Examinatoren:

drs. D.D. LAND

dr. J.B. OOSTINGA

Begeleiders DGMR:

ing. T. VERGOED

ir. J. WITTE

THE HAGUE
UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES

dGm^R

DECEMBER 20, 2018

Samenvatting

In dit rapport is nagegaan of goedkope geluidssensoren geschikt zijn voor een kwalitatieve beoordeling van de geluidsniveaus die ontstaan bij het contact tussen de band en het wegdek. Om dit te beoordelen is een sensorsysteem ontwikkeld en is onderzocht hoe de resultaten van de sensor zich onder gecontroleerde condities verhouden tegen die van gevalideerde meetapparatuur. Daarbij zijn metingen verricht aan wegdekken en dilatatievoegen om te achterhalen hoe de sensor in open condities fungeert.

Uit de resultaten van de ijking van de sensor is naar voren gekomen dat de sensor in het frequentiebereik $200 \text{ Hz} \leq f \leq 2000 \text{ Hz}$ een lineaire gevoeligheid heeft. Twee afzonderlijke metingen aan twee sensoren van hetzelfde type hebben aangetoond dat het verschil in onderling resultaat verwaarloosbaar is. De gemeten gevoeligheid van de sensor als functie van de rotatiehoek heeft laten zien dat er een afname van 2,0 dB(A) bij 180° is.

De metingen aan wegdekken hebben een snelheids- en temperatuurcoëfficiënt opgeleverd van respectievelijk $(24 \pm 7) \text{ dB/decade}$ en $(-0,18 \pm 0,06) \text{ dB}/^\circ\text{C}$. Daarbij is een geluidsreductie van (4 ± 2) en $(7 \pm 2) \text{ dB(A)}$ vastgesteld voor de open wegdekstructuren zeer open asfaltbeton en tweelaags zeer open asfaltbeton. Uit metingen aan dilatatievoegen op de A12 en de van Brienenoordbrug is duidelijk geworden dat de geproduceerde geluidsniveaus bij dilataties, ten opzichte van regulier asfalt, boven de vastgestelde norm vallen. Tevens is aangetoond dat een afname in de omgevingstemperatuur van 10°C volgens de theorie én de metingen niet bijdraagt aan een verhoging van het geluidsniveau.

Een vergelijking van de resultaten van de geluidssensor aan een bestaande dataset van een overeenkomstig type heeft een lage correlatie ($R^2 = 0,383$) opgeleverd. Bij een simultane meting aan wegdekken met gecertificeerde meetapparatuur en de geluidssensor is gebleken dat de sensor de resultaten van de gecertificeerde meting goed kan volgen, waarbij een sterke correlatie ($R^2 = 0,880$) gevonden is. De verhouding tussen het afgesaalde geluid naar voren en naar de zijkant van de band bedraagt bij dit experiment $(0,868 \pm 0,009)$.

Inhoudsopgave

1. Inleiding	4
2. Theorie	6
2.1. Akoestische golfvergelijking	6
2.2. Geluidsintensiteit	8
2.3. Geluidsniveau	9
2.4. Octaaf en tertsbanden	10
2.5. Fourieranalyse	11
2.5.1. Discrete fouriertransformatie	11
2.6. Band en wegdekgeluid	12
2.6.1. Vibraties band	13
2.6.2. Aerodynamisch	14
2.6.3. Snelheidsafhankelijkheid	16
2.6.4. Type wegdek	17
3. Meetopstelling & werkwijze	19
3.1. Schematische weergave meetsysteem	19
3.2. MEMS geluidssensor	20
3.3. Procedure ijking geluidssensor	21
3.4. Procedure CPX meting	22
4. Analyse	23
4.1. Resultaten ijking geluidssensor	23
4.1.1. Lineariteit	24
4.1.2. Richtingsgevoeligheid	25
4.2. CPX metingen	26
4.2.1. Snelheid en temperatuurcorrectie	26
4.2.2. Dilataties A12 en van Brienenoordbrug	28
4.2.3. Wegdekken	33
4.3. Vergelijk referentie	35
4.3.1. Wegdekmeten dataset	35
4.3.2. Simultaan meet aanhanger	38
5. Conclusie	40
6. Aanbevelingen	42
Referenties	43
7. Bijlage	45
A. Afleiding akoestische golfvergelijking	45
B. Fourierreeks	46
B.1. Fouriertransformatie	47

C.	Python Code	48
C.1.	Aansturing geluidssensor	48
C.2.	Aansturing GPS	50
C.3.	Aansturing temperatuursensor	51
D.	CPX auto	52
E.	NTI gevoeligheidscurve	53
F.	Grafische weergave ijking geluidssensor	54
G.	Wegdekmeten sensor	56
H.	Wegdekmeten en MEMS sensor overeenkomstige posities	57
I.	CPX simultaan	58
J.	Onnauwkeurighedsanalyse	59
J.1.	Onnauwkeurigheid in CPX metingen	59
J.2.	Onnauwkeurigheid in snelheid	60
J.3.	Onnauwkeurigheid in lineaire modellen	61

1. Inleiding

Verkeerslawaaï is een milieukwestie in zowel grootstedelijke als landelijke gebieden. Langdurige blootstelling kan naast slaapproblemen ook klinische effecten, zoals een vergroot risico op hart- en vaatziekten met zich meebrengen [1]. Vanwege deze risico's wordt er al tientallen jaren op Europees niveau beleid gevoerd omtrent geluidsniveaus. Daarnaast is in Nederland de Wet Geluidhinder [2] van kracht, met als doel de mens bescherming te bieden tegen geluidshinder afkomstig van wegverkeer, railverkeer en industrieterreinen.

Het CBS heeft berekend dat in de periode 1990 tot 2017 het aantal personenauto's met ruim drie miljoen stuks is toegenomen [3]. Dit heeft een forse impact op de totale geluidsemissie, dat naast het aantal voertuigen afhankelijk is van het type wegdek, voertuig, snelheid van het verkeer en de eventuele afscherming van bijvoorbeeld geluidsschermen.

In de loop der jaren zijn veel ontwikkelingen doorgevoerd op het gebied van stillere wegdekken. Zo levert het ZOAB (zeer open asfalt beton) een theoretische reductie geluidsniveau op van 3 dB(A) ten opzichte van het dicht asfaltbeton (DAB) referentie wegdek. Voor tweelaags ZOAB betreft de reductie zelfs 6 dB(A) [4]. Nadelen van nieuwere wegdektypes zijn, in vergelijking tot DAB, de hoge onderhoudskosten en het verlies van het geluidsreducerende vermogen na verloop van tijd door het dichtslibben van de akoestische top laag.

Het inventariseren van de staat van deze wegdekken in Nederland is noodzakelijk voor het op tijd constateren van mogelijke schade, zodat levensverlengend onderhoud uitgevoerd kan worden en de akoestische kwaliteit gewaarborgd blijft. Om deze inventarisering op een juiste manier uit te voeren wordt gebruik gemaakt van geavanceerde meetapparatuur. Zo verricht DGMR onder andere geluidsmetingen in opdracht van aannemers en gemeenten om het geluidsreducerende vermogen van wegdekken te toetsen.

Naast gecertificeerde apparatuur bestaat de mogelijkheid om met behulp van simpele sensoren geluidsmetingen uit te voeren. Deze sensoren zijn weliswaar niet in staat om in absolute zin vergelijkbare resultaten te leveren, maar kunnen desondanks een goede indicatie geven en zijn bovendien goedkoop, compact en potentieel sneller dan geavanceerde apparatuur. Voor dit onderzoek is zo'n goedkoop systeem van sensoren ontworpen en vergeleken met referentieapparatuur.

In dit rapport worden de resultaten van de metingen met het systeem van sensoren gepresenteerd. Er is onderzocht wat de gevoeligheid, richtingsafhankelijkheid en lineariteit van de geluidssensoren is. Daarbij zijn metingen verricht aan wegdekken en in het bijzonder dilatatievoegen om te onderzoeken of de sensor in staat is bruikbare geluidsmetingen te leveren. De metingen worden geanalyseerd binnen het statistische softwarepakket R [5].

De doelstellingen van het onderzoek zijn als volgt geformuleerd:

1. **In hoeverre zijn goedkope geluidssensoren in staat om gevalideerde metingen te verrichten, ten opzichte van geavanceerde referentieapparatuur?**
2. **Van welke factoren is de hoogte van het geluidsniveau bij dilatatievoegen afhankelijk, en blijkt dit ook uit de resultaten van de geluidssensoren?**

In sectie 2 wordt de theorie besproken met betrekking tot akoestische begrippen en theoretische band en wegdekniveaus. Sectie 3 omvat de werking van het systeem van sensoren, evenals de meetopstelling voor de ijking van de geluidssensor en de procedure voor de uitvoering van geluidsmetingen aan wegdekken. In sectie 4 is de analyse gedocumenteerd, waarin respectievelijk; resultaten ijking en uitwerking geluidsmetingen en vergelijking aan referentieapparatuur worden getoond. De onnauwkeurigheidsanalyse van het meetsysteem is in bijlage J uitgewerkt.

2. Theorie

In algemene zin is geluid de variaties van druk in een medium. De twee voornaamste grootheden die de mate van geluid beschrijven zijn geluidsdruk en geluidsintensiteit. Geluidsdruk is de fluctuatie van druk in een medium ten opzichte van de statische druk en wordt gemeten in Pa. Geluidsintensiteit is een vectorgrootheid die de richting en het vermogen per oppervlakte-eenheid van een geluidsgolf beschrijft en wordt gemeten in W/m^2 .

2.1. Akoestische golfvergelijking

De akoestische golfvergelijking beschrijft de voortplanting van een akoestische golf door een medium. Een eenvoudige toepassing van de golfvergelijking in één dimensie kan gegeven worden door een periodieke geluidsgolf in een lange, smalle en met gas gevulde buis. De geluidsgolf ontstaat door een oscillerende piston aan één uiteinde van de buis. In figuur 1 is de buis met oscillerende piston schematisch weergegeven. Als geldt dat de piston de posities 0 tot ∞ aan kan nemen, dan wordt de druk in de buis wiskundig gegeven door [6, p. 69]:

$$p(x, t) = p_0 \cos(kx - \omega t + \phi) \quad (1)$$

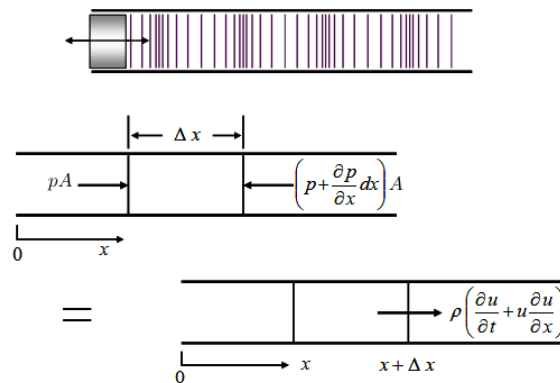
waarin:

p	geluidsdruk	(Pa)
p_0	amplitude drukgolf	(Pa)
k	golfgetal	(m^{-1})
ω	hoekfrequentie	(rad s^{-1})
ϕ	fasehoek	(rad)

Voor een buis met een eindige lengte L gelden de volgende vergelijkingen voor respectievelijk totale verplaatsing s en druk p :

$$s(x, t) = A \sin k(L - x) \cos(\omega t) \quad (2a)$$

$$p(x, t) = p_0 \cos k(L - x) \cos(\omega t) \quad (2b)$$



Figuur 1: Relatie tussen krachtbalans en verandering van impuls voor een infinitesimaal klein fluïdumelement in een buis.

Het bovenste figuur laat gebieden met hogere luchtdruk (compressie) en lagere luchtdruk (verduunning) zien. Het middelste en onderste figuur laten respectievelijk de krachtbalans en verandering in impuls in de buis zien. Hiervoor geldt dat de som van de krachten gelijk staat aan de verandering in impuls. Volgens behoud van impuls geldt dan de volgende vergelijking:

$$(pA)_x - (pA)_{x-\Delta x} = \rho A \frac{du}{dt} \Delta x \quad (3)$$

waarin:

A	oppervlakte dwarsdoorsnede	(m ²)
u	snelheid fluïdumdeeltjes	(m s ⁻¹)
ρ	dichtheid fluïdum	(kg m ⁻³)

Hieruit volgt na verdere uitwerking (volledige afleiding in bijlage A) de akoestische golfvergelijking in één dimensie.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (4)$$

waarin:

c	geluidssnelheid	(m s ⁻¹)
-----	-----------------	----------------------

Na substitutie en tweemaal differentiëren van de functie $p = f(x, t)$ levert dit d'Alembert's algemene oplossing [7, p. 49]:

$$p(x, t) = f(x - ct) + g(x + ct) \quad (5)$$

waarin $f(x)$ en $g(x)$ functies zijn die respectievelijk de translatie van de links- en rechts-bewegende golven beschrijven.

Voor een harmonische oscillatie, waarin A en B complexe grootheden zijn die door randvoorwaarden worden vastgesteld, geldt:

$$p(x, t) = Ae^{iw(t - \frac{x}{c})} + Be^{-iw(t + \frac{x}{c})} \quad (6)$$

De geluidssnelheid van een golf is verder afhankelijk van de compressiemodulus κ en dichtheid ρ van een medium, volgens het verband:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho}} \quad (7)$$

waarin:

κ	compressiemodulus	(Pa)
----------	-------------------	------

Daarnaast geldt volgens de algemene gaswet dat de dichtheid van een gas omgekeerd evenredig is met de temperatuur. Uit formule 7 volgt dan:

$$c \propto \sqrt{T}$$

2.2. Geluidsintensiteit

Elk oscillerende beweging bevat zowel kinetische als potentiële energie. Voor een massa-veersysteem ligt de kinetische energie opgeslagen in het massa element en de potentiële energie komt voort uit de door de veer geleverde arbeid bij uitrekken en samendrukken [7, p. 44]. Dezelfde energiebalans geldt voor de oscillerende beweging van deeltjes in een geluidsgolf. De totaal opgeslagen energie van een geluidsgolf per volume-eenheid is de energiedichtheid en de hoeveelheid energie die per seconde een denkbeeldig venster passeert met oppervlakte-eenheid loodrecht op de bewegingsrichting van de golf is de energieflux. Bij een venster met oppervlakte dA is de hoeveelheid energie dat gedurende een tijd dt het venster passeert, uitgedrukt in volume-eenheid dV , gelijk aan:

$$dV = c dt dA \quad (8)$$

De geluidsintensiteit volgt uit formule 8 na vermenigvuldiging met de energiedichtheid w en delen door dt en dA :

$$I = cw \quad (9)$$

waarin:

I	geluidsintensiteit	(W m^{-2})
w	energiedichtheid	(J m^{-3})

Voor de geluidsintensiteit als vectorgrootheid in de richting evenwijdig aan de voortplantingsrichting van het geluid en als functie van de geluidsdruk wordt formule 10 gebruikt:

$$\vec{I} = p \vec{v} \quad (10)$$

waarin:

$\vec{v}$	deeltjessnelheid	(m s^{-1})
-----------	------------------	---------------------

De deeltjessnelheid $\vec{v}$ beschrijft de relatief lage snelheid van de oscillerende deeltjes van de golf ten opzichte van de oorspronkelijke positie en verschilt dus van de geluidssnelheid c . Voor een bolvormige geluidsgolf geldt dat de intensiteit evenredig is met $1/r^2$, als volgt in formulevorm:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (11)$$

waarin:

P	bronvermogen	(W)
-----	--------------	--------------

De logaritmische verhouding tussen de gemeten geluidsintensiteit en een referentie intensiteit wordt gegeven door:

$$L_I = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_{\text{ref}}} \right) \quad (12)$$

waarin:

L_I	geluidsintensiteitsniveau	(dB)
I_{ref}	referentie intensiteit	(W m ⁻²)

Als referentie-intensiteit in lucht wordt $1 \cdot 10^{-12}$ W/m² aangehouden. De intensiteit door een medium met akoestische impedantie (ρc) is gelijk aan:

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad (13)$$

2.3. Geluidsniveau

De drukvariaties in geluidsgolven zijn zeer klein ten opzichte van de atmosferische druk van circa $1 \cdot 10^5$ Pa. Het laagst nog hoorbare drukverschil, de ondergrens, is $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Vanwege de grote verschillen in drukniveaus worden deze veelal omgerekend naar logaritmische waarden. De geluidsdruk is gedefinieerd als het gekwadrateerde verschil tussen de gemiddelde atmosferische druk over een gegeven periode en de gemeten atmosferische druk binnen een tijdsinterval. Het geluidsniveau is de logaritmische verhouding tussen de gekwadrateerde geluidsdruk en de gekwadrateerde referentiedruk van $2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

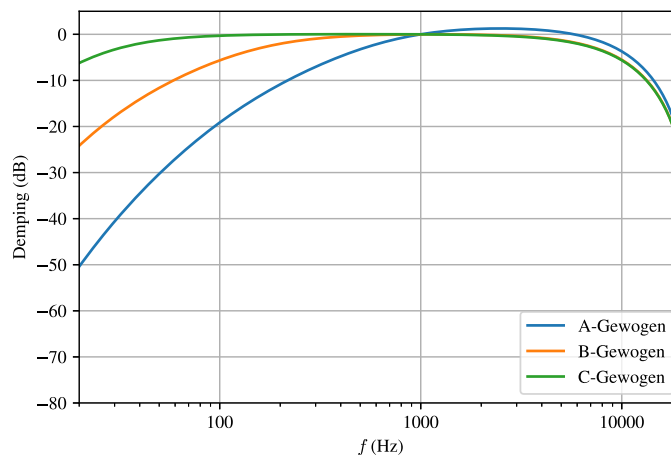
Als volgt in formulevorm:

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p^2}{p_{\text{ref}}^2} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_{\text{ref}}} \right) \quad (14)$$

waarin:

L_p	geluidsniveau	(dB)
p_{ref}	referentie druk	(Pa)

In tegenstelling tot een ideale geluidsmeter heeft het menselijk oor geen vlakke gevoeligheidscurve. De onderdelen in het oor gedragen zich als een mechanisch filter, waarbij de -3 dB punten, bij benadering, liggen bij 500 en 8000 Hz. In figuur 2 zijn typische gevoeligheidscurves voor het menselijk oor gegeven tussen de onder en bovengrens van respectievelijk 20 Hz en 20 kHz.



Figuur 2: Dempingswaarden per frequentie voor A, B en C-weging.

De A-gewogen curve laat de menselijke perceptie van het geluid zien bij verschillende frequenties ten opzichte van het werkelijke geluidsniveau. Bij 1000 Hz is de demping 0 dB, bij 20 Hz circa -50 dB en bij 20 kHz circa -9 dB. Dit betekent dat laag en hoogfrequente tonen zachter waargenomen worden dan een toon van 1000 Hz met dezelfde geluidsterkte.

Het gehoor is daarnaast eveneens niet lineair evenredig met de sterkte van het geluid. Zo worden hoge geluidsniveaus vlakker over het frequentiebereik ervaren dan lage geluidsniveaus. Voor hoge niveaus kunnen de B en C-gewogen gevoeligheidscurve van toepassing zijn. In de praktijk wordt echter, in overeenstemming met onder andere de ‘Wet geluidshinder’, de A-weging vanwege de doorgaans lage niveaus aangenomen als juiste weging. Het A-gewogen equivalente geluidsniveau wordt gedefinieerd met LA_{eq} .

2.4. Octaaf en tertsbanden

De resolutie van een geluidmeting wordt bepaald door de breedte van frequentiebanden. Een breedte van een factor twee tussen opeenvolgende frequentiebanden zijn octaafbanden en bij onderverdeling van frequenties in een breedte van $1/3$ octaafbanden zijn het tertsbanden. In tabel 1 zijn de ISO gestandaardiseerde [8] **octaaf** en tertsbanden gegeven voor de middenfrequenties.

Tabel 1: Gestandaardiseerde middenfrequenties voor **octaaf** en tertsbanden

Middenfrequenties		
50 Hz	400 Hz	3150 Hz
63 Hz	500 Hz	4000 Hz
80 Hz	630 Hz	5000 Hz
100 Hz	800 Hz	6300 Hz
125 Hz	1000 Hz	8000 Hz
160 Hz	1250 Hz	10000 Hz
200 Hz	1600 Hz	12500 Hz
250 Hz	2000 Hz	16000 Hz
315 Hz	2500 Hz	20000 Hz

De formules voor bepaling van de boven en ondergrens voor octaaf en tertsbanden zijn in tabel 2 opgenomen.

Tabel 2: Formules voor bepaling onder en bovengrens van octaaf en tertsbanden

	Octaafband	Tertsband
Middenfrequentie	f_0	f_0
Ondergrens	$f_0/\sqrt{2}$	$f_0/\sqrt[6]{2}$
Bovengrens	$f_0 \cdot \sqrt{2}$	$f_0 \cdot \sqrt[6]{2}$

2.5. Fourieranalyse

In bijlage B is een uitgebreide uitwerking van de fourierreeks en transformatie gegeven.

2.5.1. Discrete fouriertransformatie

Akoestische data wordt gesampled met een N -aantal metingen per seconde, gelijk aan de sample frequentie f_s . Deze data is niet continu, maar discreet in de tijd. Een reguliere fouriertransformatie is dus niet toereikend. In dit geval is een ‘discrete fouriertransformatie (DFT)’ nodig om dit signaal naar het frequentiedomein te vertalen.

Voor een discreet, periodiek signaal $f(t + N\Delta t)$ met amplitudes op de grondfrequentie $1/(N\Delta t)$ en hogere orde harmonische geldt dat het verschil tussen opeenvolgende frequenties gelijk staat aan $\Delta f = 1/(N\Delta t) = f_s/N$.

Enkel de frequenties in het bereik ($0 < f \leq f_s/2$) zijn voor discrete signaalanalyse van waarde. Dit vanwege het feit dat $f_s/2$, de Nyquist frequentie, de maximaal te analyseren frequentie van een signaal is zonder dat er vervorming optreedt. Als de volgende frequenties f_k in het bereik gekozen worden:

$$f_k = k\Delta f \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

Dan wordt de discrete fouriertransformatie, met $\omega = 2\pi f_k$ en $t_j = t_0, t_1, \dots, t_{N-1}$, als volgt gedefinieerd:

$$\hat{X}(f_k) = \sum_{j=0}^{N-1} X(t_j) e^{-i\omega t_j} \quad (15)$$

De DFT kan efficiënt uitgevoerd worden door gebruik van de ‘Fast Fourier Transform (FFT)’. Dit is een type algoritme dat het aantal berekeningen reduceert van N^2 tot $N \log_2 N$, waarbij N het aantal elementen in een verzameling is en een veelvoud van twee dient te zijn. In dit onderzoek wordt de discrete fouriertransformatie in de vorm van FFT gebruikt om complexe band- en wegdeksignalen om te zetten naar individuele frequentiebanden.

Hanning window

De DFT is gebaseerd op periodieke signalen. Het toepassen van DFT op een niet-periodiek signaal met een discontinuïteit tussen twee opeenvolgende samples, leidt tot een foutieve verdeling in het frequentiedomein, ook wel *spectral leakage*. Een Hanning window vermenigvuldigd met de ruwe data in het tijddomein heeft tot gevolg dat de spectral leakage in het frequentiedomein geminimaliseerd wordt. Het Hanning window heeft een cosinusvorm die buiten een gegeven interval nul is. In formulevorm als volgt gedefinieerd:

$$w(n) = \begin{cases} w(n) = 0,5 \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1} \right) \right] & 0 \leq n < N \\ 0 & \text{anders} \end{cases} \quad (16)$$

2.6. Band en wegdekgeluid

Het geluid van een rijdend voertuig komt van de motor en van de interactie tussen de band en het wegdek. In de loop der jaren zijn motoren stiller geworden, hierdoor wordt motorgeluid alleen nog bij snelheden tot 30 km/u dominant ervaren [9].

De opwekking van de geluidsniveaus die ontstaan bij het contact tussen band en wegdek volgen het patroon [10]:

$$\text{Excitatie} \longrightarrow \text{Respons} \longrightarrow \text{Afstraling} \longrightarrow \text{Overdracht}$$

Excitatie van de band ontstaat door wisselkrachten ten gevolge van onregelmatigheden in de loopvlakken van de band en het wegdek. Als respons op de krachten wordt de band in trilling gebracht. Een deel van deze trilling wordt omgezet naar hoorbaar geluid, dit is de afstraling. De overdracht van dit geluid naar de omgeving is bolvormig.

Het afgestraalde vermogen als functie van de frequentie wordt als volgt bepaald [11]:

$$P(f) = \rho c v_b^2(f) S \sigma(f) \quad (17)$$

waarin:

v_b	trillingssnelheid band	(m s ⁻¹)
S	oppervlak band	(m ²)
σ	afstraalgraad	(-)

De afstraalgraad wordt gedefinieerd als de verhouding tussen het afgestraalde vermogen en het totale vermogen van de band. In tabel 3 zijn enkele mechanismes en versterkingsmechanisme voor de opwekking van band en wegdekgeluid gegeven.

Tabel 3: Mechanismes en versterkingsmechanisme voor opwekken van band en wegdekgeluid

Type	Mechanisme
<i>Impact</i>	1.a) Loopvlak band 1.b) Textuur wegdek
<i>Adhesie</i>	2.a) Stick-slip effect 2.b) Stick-snap effect
<i>Aerodynamisch</i>	3.a) Turbulente stromingen 3.b) Pompeffect groeven band 3.c) Resonanties groeven band 3.b) Helmholtz resonanties
<i>Versterkingsmechanisme</i>	Hoorn effect

2.6.1. Vibraties band

Loopvlak band

Het loopvlak op de band zorgt voor een constante onderbreking in de radiale verplaatsing van de band ten opzichte van het wegdek. Aangezien het wegdek onsamendrukbaar is absorbeert de band deze onregelmatigheden. Dit veroorzaakt vibraties in de band, waarvan de frequenties afhankelijk zijn van de lengte van de loopvlakken en de snelheid van het voertuig, in formulevorm als volgt:

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (18)$$

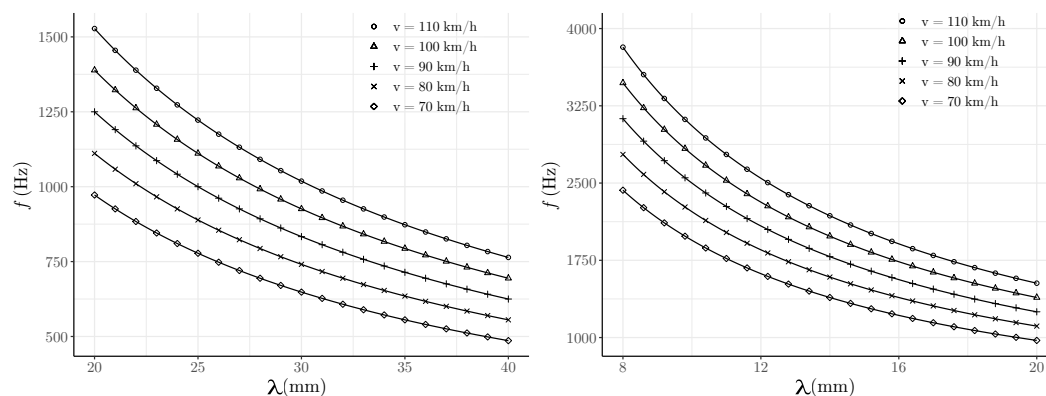
waarin:

v	snelheid voertuig	(m)
λ	lengte loopvlak	(m)

Textuur wegdek

Voor oneffenheden aan het oppervlak van het wegdek wordt eveneens gebruik gemaakt van formule 18. Met als verschil dat in dit geval de oppervlakte textuur van het wegdek de klap op de band induceert, waarbij λ nu geldt als de lengte van een oneffenheid.

In figuur 3 zijn de theoretische frequenties opgenomen voor beide mechanismes, waarbij voor λ typische waarden zijn gekozen van $20 \text{ mm} \leq \lambda \leq 40 \text{ mm}$ en $8 \text{ mm} \leq \lambda \leq 20 \text{ mm}$ voor respectievelijk loopvlak band en textuur wegdek.



Figuur 3: Lengte van loopvlak band (linker figuur) en lengte oneffenheid wegdek (rechter figuur) als functie van de theoretische frequentie van het geproduceerde geluid in het snelheidsbereik van 70 tot 110 km/h.

Adhesie

Het *stick-slip* effect is een spontaan schokkende beweging ten gevolge van het over elkaar schuiven van twee materialen. In het geval het rubber van de band en het asfalt. Dit effect is afhankelijk van de wrijvingscoëfficiënt en de relatieve snelheid van de band en wegdek. Met name bij acceleratie en remmen is dit effect van belang, aangezien het overwinnen van de statische wrijvingskracht meer kracht kost dan overwinnen van de kinetische wrijvingskracht. Bij constante snelheid is dit effect van minder belang.

Het *stick-snap* effect treedt op door de adhesie van de loopvlakken van de band met het wegdek. Bij het loslaten van het loopvlak ontstaat er een trilling zolang het loopvlak naar de oorspronkelijke positie terugkeert. Dit effect is afhankelijk van de temperatuur en treedt met name op bij droge condities. Doordat de meeste wegdekken bedekt zijn met een laag vuil worden de adhesie mechanismes aanzienlijk gereduceerd.

Beide effecten zijn van toepassing op de geluidsbijdrage boven 1000 Hz.

2.6.2. Aerodynamisch

Turbulente effecten

Aerodynamisch turbulente effecten rondom een band kunnen onderverdeeld worden in twee mechanismes:

- Doordat de kolom lucht aan de voorkant van de band in de longitudinale richting onderbroken wordt, ontstaan er turbulente stromingen.
- Door de rotatie van de band ontstaan er wervelingen rondom de band die het gevolg zijn van de wrijving tussen de lucht en de loopvlakken.

Onderzoek [12] heeft uitgewezen dat het onwaarschijnlijk is dat aerodynamisch turbulente effecten een effectieve bijdrage leveren aan het totale geluidsniveau.

Pompeffect groeven band

De groeven tussen de loopvlakken van de band worden na contact met het wegdek aan de voorkant gecompriëerd en aan de achterkant geëxpandeert. Dit heeft aan de voorkant tot gevolg dat de lucht wordt weggedrukt. Aan de achterkant wordt de lucht in de groef gezogen. De holtes fungeren hier in feite als akoestische monopolen. Dit mechanisme vindt plaats in de groeven van de band en tevens, alhoewel minder van belang, in de holtes van het wegdek [13]. Dit effect is van bijdrage in het frequentiegebied boven 1 kHz.

Resonanties groeven band

In de ruimte tussen de groeven van de band en het wegdek ontstaan holtes, die benaderd kunnen worden als een buis met beide uiteindes open. De resonantie frequenties in een buis zijn afhankelijk van de geometrische eigenschappen van de band en worden niet bepaald door de rotatiesnelheid. Enkel de bandenspanning en het gewicht van de auto zijn enigszins van invloed op de frequenties, aangezien het contact tussen het loopvlak en

het wegdek afhankelijk is van deze variabelen. Dit effect treedt op in het frequentiegebied boven 1 kHz.

Helmholtz resonantie

Naast dat de groeven van de band fungeren als een buis met open uiteinden zijn het ook Helmholtzresonators. Dit betekent dat het volume luchtelement in de groeven van de band dienst doen als een resonerende veer. Als de groef van de band in aanraking komt met een geluidsgolf ontstaat een overdruk aan de opening van de groef. Hierdoor wordt de massa van het luchtelement heen en weer bewogen. Dit geeft een geluidsgolf in het middensegment frequenties, waarvan de sterkte afneemt bij toenemende frequentie.

Hoorn effect

Het geluid dat ontstaat aan de voor -en achterkant van de band wordt versterkt doordat het gebied onder de band en het wegdek als een hoorn fungeren. Vanwege de vorm van dit gebied vanaf de zijkant van de band wordt dit het hoorn effect genoemd.

Deze versterking kan oplopen tot 25 dB(A) voor de frequenties tot 1000 Hz [14]. Daarnaast geldt dat het hoorn effect toeneemt bij een bredere band en gereduceerd kan worden door een geluidsreducerend wegdek.

2.6.3. Snelheidsafhankelijkheid

Gegeven formule 17, waaruit blijkt dat $P \propto v_b^2$. Daarnaast geldt bij combineren van formules 11 en 13 dat:

$$P \propto I; I \propto p^2 \rightarrow P \propto p^2$$

Combineren van beide evenredigheden geeft dan $p^2 \propto v_b^2$.

Aangezien v_b en de voertuigsnelheid v beide evenredig met f zijn, kan gesteld worden dat:

$$p^2 \propto v^2$$

De logaritmische snelheidsverhouding kan dan uitgedrukt worden in de volgende relatie:

$$L_p \sim 20 \log_{10} (v/v_{\text{ref}}) = 10 \log_{10} (v/v_{\text{ref}})^2 \quad (19)$$

waarin:

$$v_{\text{ref}} \quad \text{referentie snelheid} \quad (\text{m s}^{-1})$$

De snelheidsexponent in formule 19 heeft een minimale waarde van 2, zoals volgt uit de gegeven evenredigheidsrelaties, maar varieert per mechanisme.

In tabel 4 zijn de mechanismes van band en wegdek geluidsniveaus met snelheidsexponent en meest dominante frequentiegebied opgenomen. Deze waarden zijn op empirische manier tot stand gekomen [15].

Tabel 4: Prominente mechanisme voor opwekken van band en wegdek geluid

Mechanisme	Snelheidsexponent	Frequentiegebied
1.a) Loopvlak band	2,0 - 3,5	100 tot 1500 Hz
1.b) Textuur wegdek	2,0 - 3,5	100 tot 4000 Hz
2.a) Stick-slip effect	3,0 - 5,0	1000 tot 4000 Hz
2.b) Stick-snap effect	3,0 - 5,0	
3.a) Pompeffect groeven band	4,0 - 5,0	
3.b) Resonanties groeven band	0	500 tot 2500 Hz
3.c) Helmholtz resonanties	0	

Het hoorn effect is in deze tabel niet opgenomen omdat het een versterkingsmechanisme is dus geen mechaniek dat band en wegdek geluid induceert. De gegeven frequentiegebieden zijn de uiterste gebieden. In algemene zin kan verondersteld worden dat vibraties van de band dominant zijn in het lagere segment frequenties (tot 1000 Hz) en aerodynamische mechanismes met name in het hogere segment dominant voorkomen (> 1000 Hz). Het meest problematische frequentiegebied voor band en wegdek geluidsniveaus ligt rond de 1000 Hz, zo blijkt uit onderzoek [16].

2.6.4. Type wegdek

De meest gangbare wegverhardingen in Nederland zijn asfaltverhardingen [17]. Asfalt is een mengsel van mineraalaggregaat en bitumen. Het mineraalaggregaat bestaat uit de bestanddelen steen, zand en vulstof, dat met bitumen aan elkaar wordt gekleefd. Regulier dicht asfaltbeton bestaat voor ongeveer 57% uit stenen, 30% uit zand, 7,5% uit vulstof en 5,5% uit bitumen.

Het type zeer open asfaltbeton kenmerkt zich door de open asfaltstructuur, waarin een minimaal percentage bestanddeel stenen van 70% verwerkt is. En het nieuwere type tweelaags open asfaltbeton bestaat uit een onderlaag van zeer open asfalt en een dunne top laag van fijn zeer open asfalt. In tabel 5 zijn enkele voor- en nadelen en levensduur van de diverse type asfalt opgenomen.

Tabel 5: Meest voorkomende asfalttypes voor personenauto's in Nederland.

Type	Voor- en nadelen	Levensduur
DICHT ASFALTBETON (DAB)	<i>Referentie wegdek</i>	12-18 jaar
EENLAAGS ZEER OPEN ASFALTBETON (ZOAB)	+ Geluidsreductie van 4 dB(A) + Waterafvoerend + Nauwelijks spoorvorming - Verminderd contact band en wegdek - Grotere kans op loslaten top laag - Hoge aanlegkosten - Hoge onderhoudskosten	11-17 jaar
TWEELAAGS ZEER OPEN ASFALTBETON (TZOAB)	++ Geluidsreductie van 6 dB(A) ++ Waterafvoerend - - Hoge aanlegkosten - - Hoge onderhoudskosten	9-13 jaar

ZOAB is in eerste instantie ontworpen om opspattend water bij natte wegdekken tegen te gaan. De holtes in dit wegdek zorgen dat water niet op het wegdek blijft liggen, maar in het wegdek sijpelt. Bijkomstig voordeel van dit type wegdek bleek de geluidsabsorberende werking. Het band en wegdek geluid wordt voor een deel geabsorbeerd door de vele holtes in het wegdek. Bij een snelheid van 120 km/u is de theoretische geluidsreductie 4 dB(A) en 6 dB(A) voor respectievelijk eenlaags en tweelaags ZOAB.

Nadeel van ZOAB wegdekken is het snel vervuild raken van de top laag, waardoor het geluidsreducerende vermogen afneemt. Voor deze wegdekken is het van belang dat de holtes regelmatig (1 à 2 keer per jaar) gereinigd worden. Vanwege de open structuur zijn deze wegdekken meer vatbaar voor weersomstandigheden, waardoor het bitumen bros wordt. De gemiddelde levensduur ligt dus ook lager in vergelijking tot dicht asfaltbeton. In Nederland is zo'n 90% van de wegdekken verhard met een type ZOAB.

Dilataties: Een dilatatie is de splitsing van twee wegvlakken op een brugdek of viaduct door een voeg met als functie om het uitzetting en krimpen van het asfalt ten gevolge van temperatuursverandering op te vangen. De lengteverandering is afhankelijk van de lineaire uitzettingscoëfficiënt α , deze wordt als volgt bepaald [18]:

$$\alpha = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dT} \quad (20)$$

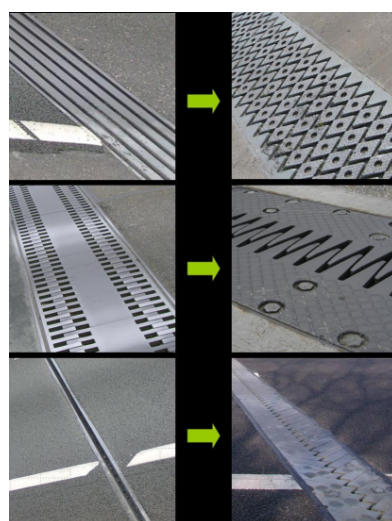
waarin:

α	lineaire uitzettingscoëfficiënt	(K ⁻¹)
L_0	initiële lengte wegdek	(m)

Na integreren volgt dat de verandering van de lengte van de dilatatieopening gelijk staat aan de verandering van de wegdekken: $\pm \Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T$.

In de loop der jaren zijn veel traditionele dilataties vervangen door geluidsarme varianten.

In figuur 4 zijn voorbeelden van veelvoorkomende dilataties weergegeven. De dilataties bij brugdekken en viaducten zijn normaliter van kunststof, staal of beton. Van boven naar onder in het figuur zijn de dilataties beschreven als; *dilataties met lamel-lenovergang*, *vingervoegen* en *‘Nosing joints’*. De hoogte van het geluidsniveau bij een dilatatieovergang is afhankelijk van: het type dilatatie, de grootte van de dilatatieopening, de hoek die het voertuig met de dilatatie maakt en eventuele hoogteverschillen tussen de wegvlakken. Door de toename in geluidsreducerende wegdekken is de geluidsemisatie bij dilataties meer gaan opvallen. Rijkswaterstaat heeft een maximale toename van 5 dB(A) vereist voor voegovergangen. Deze toename is gebaseerd op basis van geluidsmetingen op een afstand van 7,5 meter van een voertuigpassage bij een representatieve snelheid. In formule als volgt:



Figuur 4: Traditionele dilataties (linker figuren) en geluidsarme varianten (rechter figuren) [19].

$$L_{SPB,voeg} - (L_{SPB,wegdek} + W) \leq 5 \quad (21)$$

waarin:

$L_{SPB,voeg}$	geluidsniveau voeg	(-)
$L_{SPB,wegdek}$	geluidsniveau wegdek	(m)
W	wegingsfactor	(m)

SPB staat voor ‘Statistical Pass By’, de methode voor band en wegdek geluidsmetingen op afstand en W is de wegingsfactor van 2 dB(A) bij wegdekken jonger dan 2 jaar.

Bij verwaarlozing van bodemabsorptie is de maximale toename van 5 dB(A) voor SPB metingen tevens de maximale toename voor metingen dichtbij de band (CPX).

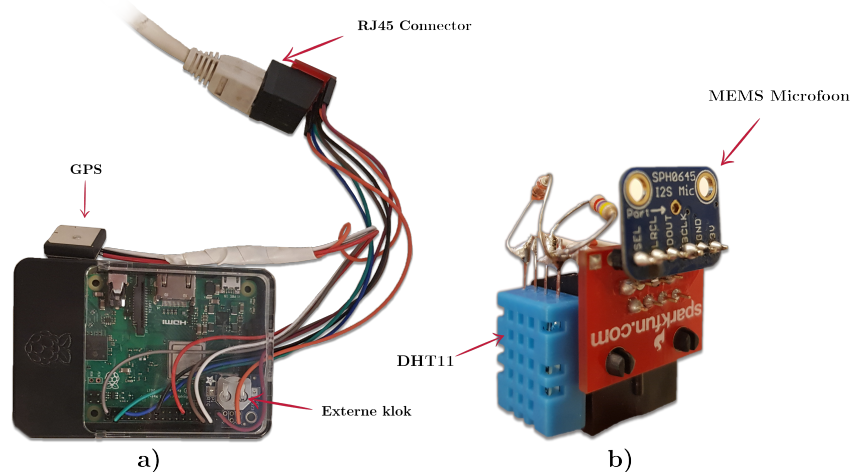
3. Meetopstelling & werkwijze

3.1. Schematische weergave meetsysteem

Om te onderzoeken of goedkope sensoren in staat zijn om resultaten te leveren die vergelijkbaar zijn met gevalideerde apparatuur wordt een meetsysteem ontwikkeld.

Dit systeem moet als voordeel hebben, ten opzichte van een geavanceerd systeem, dat het compact en eenvoudig onder een auto te monteren is. Daarbij is het van belang dat met tien keer per seconden gemeten kan worden, zodat bij 100 km/u wegvlakken van circa 2,7 meter gesampled worden. Verder wordt voor band en wegdek geluidsniveaus een ISO-norm spectrale resolutie in tertsbanden vereist.

Voor de aansturing van sensoren en het verwerken van data wordt een Raspberry Pi singleboardcomputer gebruikt. Met daarbij een DHT11 temperatuursensor, voor meten van relevante meteorologische gegevens, en een digitale MEMS geluidssensor voor het registreren van het geluid afkomstig van band en wegdek. Daarnaast is een Global Positioning System (GPS) en externe klok voor bijhouden van de juiste tijd toegevoegd. In figuur 5 is een schematische weergave van het systeem gegeven.



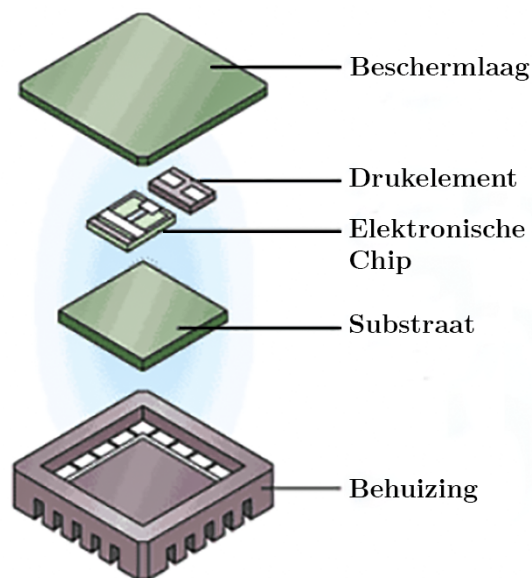
Figuur 5: a) Schematische weergave meetsysteem, met aanduiding van GPS en externe klok.
b) close-up weergave van digitale MEMS geluidssensor en DHT11 temperatuur- en vochtsensor.

De Raspberry Pi wordt via de USB-uitgang van de auto van stroom voorzien en stuurt hiermee gelijktijdig de geluidssensor, temperatuursensor en GPS via PYTHON scripts aan. In bijlage C zijn de scripts voor het aansturen van de sensoren opgenomen.

De sample frequentie van de geluidssensor is 48 kHz, deze wordt direct onderverdeeld in stukken van 4800 Hz, zodat met een integratietijd van 100 ms de middelingsfrequentie 10 Hz is. Voor de GPS en temperatuursensor gelden respectievelijk de sample frequenties van 1 Hz en 1/3 Hz. De geluidsniveaus worden op basis van meeste nabije tijd (met een tolerantie van 100 ms) aan de GPS en temperatuur gegevens gekoppeld. De ontbrekende GPS en temperatuurwaarden, door het verschil in sample frequentie, worden benaderd door lineaire interpolatie van twee op een volgende waarden.

3.2. MEMS geluidssensor

De onderzochte geluidssensor is van het type MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). MEMS sensoren zijn geminiaturiseerde mechanische en elektro-mechanische elementen die een mechanisch signaal omzetten naar een elektrisch signaal. In figuur 6 is de structuurweergave van een typische luchtdruk MEMS sensor weergegeven. Het drukelement is een dun membraan dat buigt door drukvariaties in de atmosferische druk ten gevolge van geluidsgolven. De beweging van het membraan zorgt voor een verandering van de elektrische capaciteit van het membraan ten opzichte van de referentie capaciteit van de achterplaat van de sensor. Dit verschil wordt vertaald naar een spanning door het geïntegreerde circuit. Onder het membraan zit een lege ruimte die dienst doet als akoestische resonator en in de achterplaat zitten gaten die zorgen voor een continue flow van lucht door het systeem en derhalve toestaan dat het membraan terug kan keren in de oorspronkelijke positie. MEMS microfoons vertonen typisch laagfrequent een lagere gevoeligheid vanwege deze ventilatie gaten in de achterplaat en een verhoogde responsie bij hoogfrequent geluid in verband met het Helmholtz effect in de lege ruimte.



Figuur 6: Schematische structuurweergave MEMS druksensor [20].

In het geval van deze digitale MEMS sensor wordt het analoge signaal geconverteerd naar een digitaal signaal, waarbij het uitgangssignaal met een logische poort tussen 0 (laag) of hoog (1) schakelt en maakt daarnaast gebruik van 'Pulse Density Modulation (PDM)'. Dit is een vorm van modulatie met als doel om een analoge signaal uit te drukken in een binair formaat. De dichtheid van de pulsen op de uitgang van de microfoon is evenredig met de (plotselinge) verandering in atmosferische druk.

De sensor maakt daarnaast gebruik van een ingebouwde klok en L/R control. De klokfrequentie, instelbaar van 1 MHz tot 3,5 MHz, definieert de sample frequentie van het systeem alsmede het reguleren van de PDM. De L/R control maakt het integreren van een tweede microfoon mogelijk, zodat geluid in stereo gesampled kan worden. In formule 22 is de conversie voor bewerking van de ruwe 32 bit geluidsdata naar decibel Full Scale (dBFS) gegeven.

$$\text{Sensorwaarde(dBFS)} = 20 \log_{10} \left(\frac{\text{Fourier}(\text{data})/2^{32}}{\sum \text{Hann}(\text{data})} \right) \quad (22)$$

Hierin betreft data de conversie van de ruwe geluidsmeting naar de bewerkte geluidsmeting door toepassing van achtereenvolgens A-weging, Hann window en fourieranalyse.

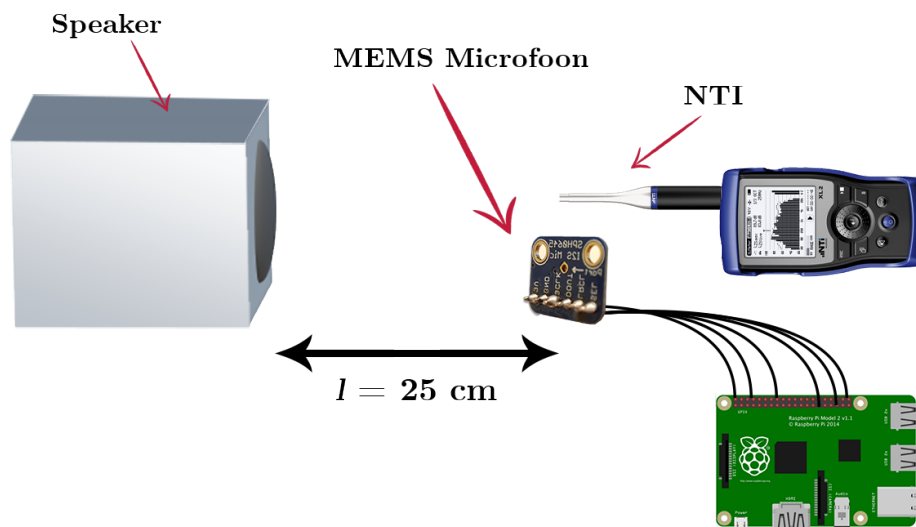
3.3. Procedure ijking geluidssensor

Om op het wegdek zinvolle metingen te doen die qua orde grootte overeenkomen met een gevalideerd meetinstrument wordt de geluidssensor gekoppeld met de NTI M2230 in combinatie met de NTI XL2 AUDIO AND ACOUSTIC ANALYZER. Deze configuratie bestaat uit een gecertificeerde klasse 1 microfoon met voorversterker (serienummer S1043) en een geluidsmeter voor verwerking van data. Dit biedt onder andere mogelijkheden tot uitvoering van FFT analyse met een bandbreedte van 0,4 Hz en octaaf/tertsbandanalyse in het frequentiebereik van 5 Hz tot 20 kHz. In tabel 6 zijn enkele relevante specificaties van de klasse 1 microfoon opgenomen.

Tabel 6: Enkele specificaties van de NTI in combinatie met M2230 microfoon

Bereik:	17 dB(A) - 137 dB
Bandbreedte (-3 dB punt):	5 Hz - 23,6 kHz
Nauwkeurigheid (bij 1 kHz):	$\pm 0,5\%$
Lineair gebied ($\pm 0,1$ dB):	12 Hz - 21,3 kHz

De gevoeligheidscurve van de NTI is opgenomen in bijlage E figuur A2. In figuur 7 is de schematische opstelling weergegeven voor de ijking van de geluidssensor met de NTI.



Figuur 7: Schematische weergave opstelling voor ijking van de geluidssensor met de NTI.
NB. De geluidssensor is in werkelijkheid niet zo groot, dit is enkel ter verduidelijking van de opstelling.

Voor het toetsen van de gevoeligheid van de geluidssensor ten opzichte van de NTI wordt witte ruis gebruikt. Witte ruis bestaat uit een serie van ongecorreleerde stochastische elementen, waarvan de gemiddelde amplitude per tertsband gelijk is. De geluidssensor staat op een kleine verhoging, zodat de hoogte gelijk is aan die van de NTI, met daarnaast de NTI. Beide staan loodrecht gepositioneerd op een afstand van (25 ± 2) cm ten opzicht van de verticale positie van de speaker. Het witte ruis fragment wordt afgespeeld met een duur van (60 ± 5) sec. Deze meting wordt negen keer per equivalent geluidsniveau herhaald, zodat voor elk onderzocht geluidsniveau de standaarddeviatie van het gemiddelde bepaald kan worden. De equivalente gemeten geluidsniveaus zijn in ordegrootte vergelijkbaar met band en wegdekniveaus, en zijn achtereenvolgens 80, 90, 100, 110 dB(A).

Daarnaast worden twee nieuwe, zelfde type, geluidssensoren aan een witte ruismeting onderworpen om te onderzoeken of beide een eenduidig resultaat vertonen.

De onnauwkeurigheid die bij de metingen geïntroduceerd wordt als gevolg van reflecties met de tafel, wanden of objecten is niet van invloed op de kwaliteit van de meetresultaten. Het gaat bij dit experiment immers om referentiemetingen, waarbij het verschil tussen twee metingen getoetst wordt (geluidssensor en NTI én geluidssensoren onderling).

Volgens de specificaties heeft de geluidssensor een omni-directionele functionaliteit.

Dit houdt in dat de hoek die de sensor maakt met de richting evenwijdig aan de bewegingsrichting van het geluid niet van invloed is op het gemeten geluidsniveau.

De richtingsafhankelijkheid wordt met dezelfde opstelling buiten op een relatief open terrein uitgevoerd om de invloed van reflecties zoveel mogelijk te beperken. De afstand l wordt hierbij verhoogd van 25 cm tot circa $(1,5 \pm 0,1)$ meter zodat buiten het nabijheidsveld van de speaker gemeten wordt.

3.4. Procedure CPX meting

De metingen aan wegdekken en dilataties in dit onderzoek worden verricht door een niet-gecertificeerde ISO-norm [8] close-proximity (CPX) meetopstelling. De officiële CPX ISO-norm stelt eisen aan een gecertificeerde meting, waaronder het gebruik van een specifiek bandtype, bandenspanning, het gebruik van minimaal twee microfoons en de positionering van deze microfoons op een vastgestelde afstand onder een vastgestelde hoek. Vanwege praktische redenen kan onder een personenauto niet voldaan worden aan deze eisen.

In dit onderzoek worden de sensoren met een windbol aan de voorkant van een elektrische auto op een positie van circa 10 cm van de band gepositioneerd. Voor de elektrische auto is gekozen vanwege het feit dat er geen motorgeluid aanwezig is en de sensoren relatief eenvoudig bevestigd kunnen worden aan de onderkant van de auto.

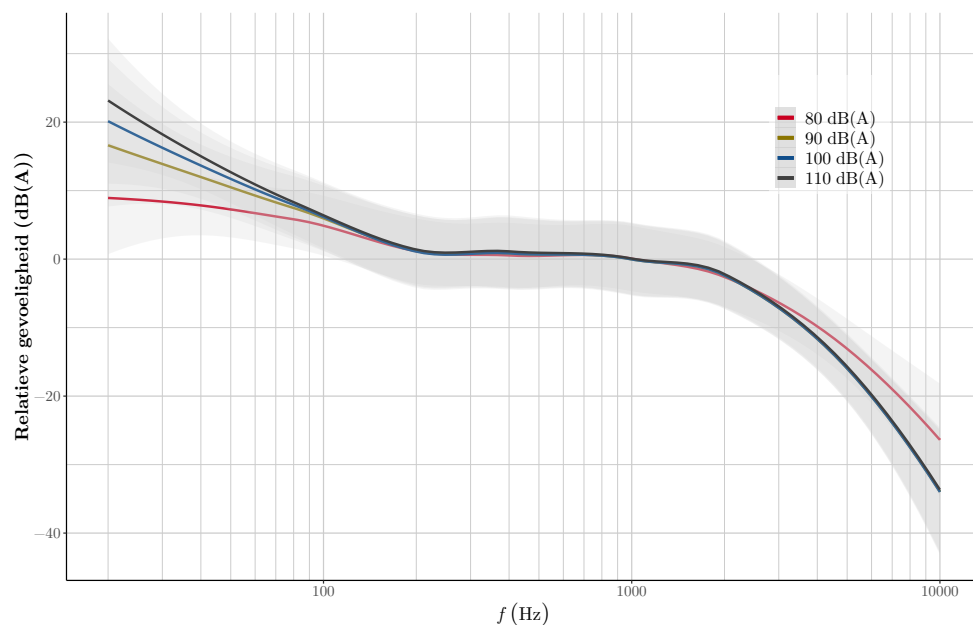
De sensoren zijn omhult met een geïmpregneerde windbol zodat de invloed van windgeruis op de metingen onderdrukt wordt en om de microfoon bescherming te bieden tegen opspattend vuil en water. In bijlage D figuur A1 is een foto van de exacte positie gegeven.

4. Analyse

4.1. Resultaten ijking geluidssensor

In deze sectie worden de resultaten met betrekking tot de ijking van de geluidssensor met de NTI getoond en geanalyseerd. Het logaritmisch gemiddelde van tien witte ruismetingen per tertsbands met daarbij standaarddeviaties, voor zowel de geluidssensor (linker y -as) als voor de NTI (rechter y -as) bij een equivalent A-gewogen geluidsniveau van achtereenvolgens 80, 90, 100 en 110 dB(A) zijn in bijlage F figuur A3 opgenomen. De standaarddeviatie per tertsbands is in bijlage F figuur A4 gegeven.

Uit de resultaten van de metingen in figuur A3 is het mogelijk om een gevoeligheidscurve van de geluidssensor te maken. Het verschil in meetwaarde tussen de NTI en sensor op de 1000 Hz tertsbands wordt als referentiewaarde aangenomen. Deze waarde wordt opgeteld bij elke tertsbandswaarde van de sensor, zodat een genormaliseerde gevoeligheidscurve ontstaat die geschaald is ten opzichte van 1000 Hz. De correctie waarden zijn gefit met een ‘local’-regressie curve om de vorm aan te duiden en oneffenheden minder zwaar mee te laten wegen. In figuur 8 is deze curve gegeven voor elk geluidsniveau. De grijze banden rondom de curves zijn 95% betrouwbaarheidsintervallen, die de spreiding in de fit aanduiden.



Figuur 8: Genormaliseerde responsie witte ruismetingen van geluidssensor met NTI als referentiewaarden. Figuur is geschaald ten opzichte van 1000 Hz tertsbands. Grijze banden zijn 95% betrouwbaarheidsintervallen.

Om met de sensor op het wegdek valide resultaten te leveren is het van belang dat de resultaten van de sensor gecorrigeerd worden ten opzichte van de NTI metingen. De correcties ten opzichte van de 1000 Hz tertsbands zijn respectievelijk 107,6; 107,3;

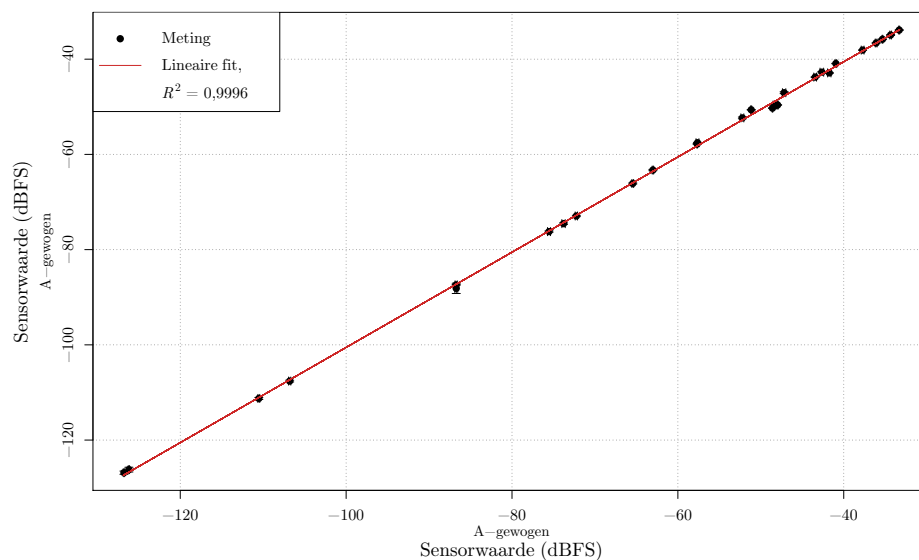
107,3 en 106,9 dB voor de geluidsniveaus 80, 90, 100 en 110 dB(A). De oplopende gevoeligheid in het laagfrequente gebied houdt strikt genomen in dat de sensor in dit gebied relatief meer geluid opvangt dan de NTI. Dit is hoogst onwaarschijnlijk en versterkt enkel de conclusie dat de speaker laagfrequent weinig tot geen geluid heeft uitgestraald en dat de gemeten waarden door de ruisvloer van de geluidssensor in dit gebied tot stand zijn gekomen. Als de ± 3 dB waarden van de curves als eis voor het lineaire bereik van de sensor gelden, dan is dit bereik in tertsbanden als volgt gegeven:

$$200 \text{ Hz} \leq f \leq 2000 \text{ Hz}$$

Echter, aangezien de 2500 en 3150 Hz tertsband relevante frequentiebanden zijn voor band en wegdek geluid worden deze frequentiebanden wel meegewogen in de analyse van de verdere resultaten in dit rapport en de berekening van equivalente geluidsniveaus. Ook worden de dBFS geluidssensor waarden gecorrigeerd naar dB(A) waarden door de correctie met de 1000 Hz tertsband bij 90 dB(A) door te voeren voor elke tertsband.

4.1.1. Lineariteit

Twee nieuwe zelfde type geluidssensoren zijn onderworpen aan witte ruismetingen om de mogelijke spreiding in geluidsniveaus in kaart te brengen. Het gemiddelde resultaat van tien metingen met standaarddeviatie in beide richtingen is opgenomen in figuur 9.



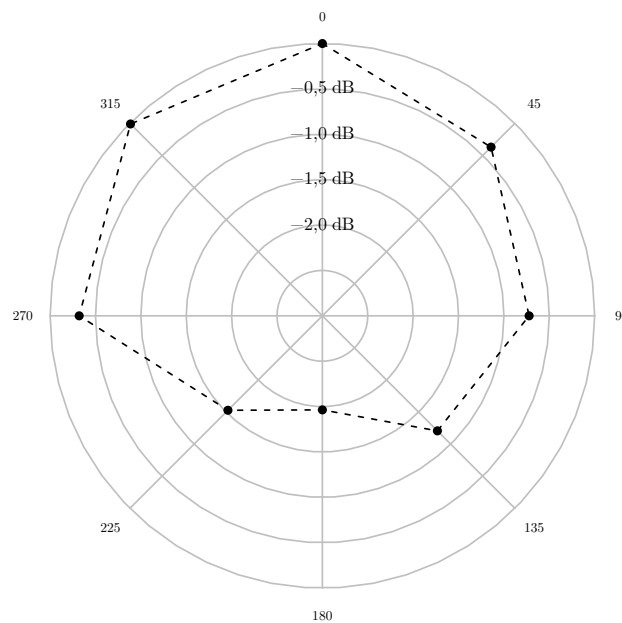
Figuur 9: Witte ruismetingen van twee nieuwe geluidssensoren, met lineaire fit.

De standaarddeviatie balken zijn voor veel punten zo klein dat deze niet zichtbaar zijn. De twee sensoren vertonen een nagenoeg gelijk beeld bij deze vergelijking met een haast ideale correlatiecoëfficiënt van 0,9996. Dit houdt in dat de spreiding tussen zelfde type sensoren verwaarloosbaar is en dat er dus geen toegevoegde onnauwkeurigheid is bij metingen aan wegdekken ten gevolge van het gebruik van verschillende sensoren van dit type.

4.1.2. Richtingsgevoeligheid

Voor het toetsen van de richtingsgevoeligheid van de sensor wordt aangenomen dat de NTI microfoon een omni-directionele functionaliteit heeft. De afname in geluidsniveau die de NTI registreert bij het roteren wordt derhalve volledig toegekend aan een toename in de afstand tussen de NTI en de speaker. Het is immers niet mogelijk om bij het roteren van de NTI en sensor de afstand tot de speaker exact constant te houden.

Het verschil in geluidsniveau bij elke hoek voor de NTI ten opzichte van het geluidsniveau bij 0° wordt bij de waarden van de sensor opgeteld. Hierdoor zijn de gemeten verschillen in geluidsniveau enkel het gevolg van de variatie in rotatiehoek. De relatieve gevoeligheid bij de equivalente geluidsniveaus van de sensor zijn in een polaire weergave in figuur 10 getoond.



Figuur 10: Polaire weergave richtingskarakteristiek van geluidssensor. NB. De gestreepte lijnen dienen enkel ter verbinding en zijn niet de werkelijk gemeten punten.

Bij het berekenen van A-gewogen equivalente geluidsniveaus is de 1000 Hz tertsband dominant. Dit figuur is dan ook voornamelijk representatief voor deze tertsband.

Het figuur laat zien dat de geluidssensor niet geheel omni-directioneel is. Bij 180° vertoont de sensor een afname van bijna 2 dB ten opzichte van 0° . Dit is te verklaren door de geometrie van de sensor. De ingang van de geluidssensor zit immers aan de voorkant. Bij een rotatie van 180° moet de geluidsgolf eerst om de sensor heen alvorens deze gedetecteerd kan worden. Verder blijkt dat de sensor minder gevoelig is voor de rotatie linksom (loodrecht op de bewegingsrichting van het geluid) dan voor rechtsom. Doordat bij de geluidsmetingen continue op dezelfde positie en bij een richting loodrecht aan de bron is gemeten, is de invloed van de richtingsafhankelijk van de sensor verwaarloosbaar op de resultaten.

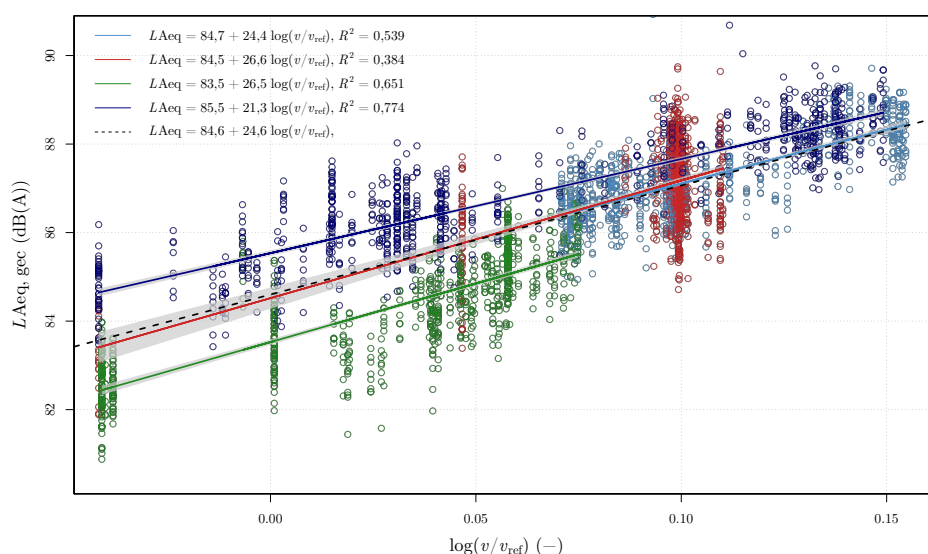
4.2. CPX metingen

In deze sectie worden de resultaten van de CPX geluidsmetingen en temperatuurmetingen voor de verschillende meetdagen weergegeven en geanalyseerd.

4.2.1. Snelheid en temperatuurcorrectie

Uit formule 19 is gebleken dat de gemeten geluidsniveaus mede afhankelijk zijn van de snelheid van het voertuig. Het is daarom belangrijk om te corrigeren voor deze snelheid zodat de werkelijke geluidsniveaus overblijven die ontstaan ten gevolge van natuurkundige mechanismes en onafhankelijk zijn van de invloed van snelheid.

In figuur 11 is de voor temperatuur gecorrigeerde logaritmische snelheidsverhouding tussen de gemeten snelheid v en de referentiesnelheid v_{ref} van 80 km/h gegeven, zoals deze in de ISO norm [21, sec. 11.1] en formule 19 beschreven staan.



Figuur 11: Equivalent gemeten geluidsniveaus op één segment wegdek als functie van de Logaritmische verhouding tussen v en v_{ref} , bij relatief constante temperatuur en bij een referentiesnelheid van 70 km/h. Lineaire fits staan voor verschillende meetdagen. De gestreepte lijn is het gemiddelde van de lineaire fits.

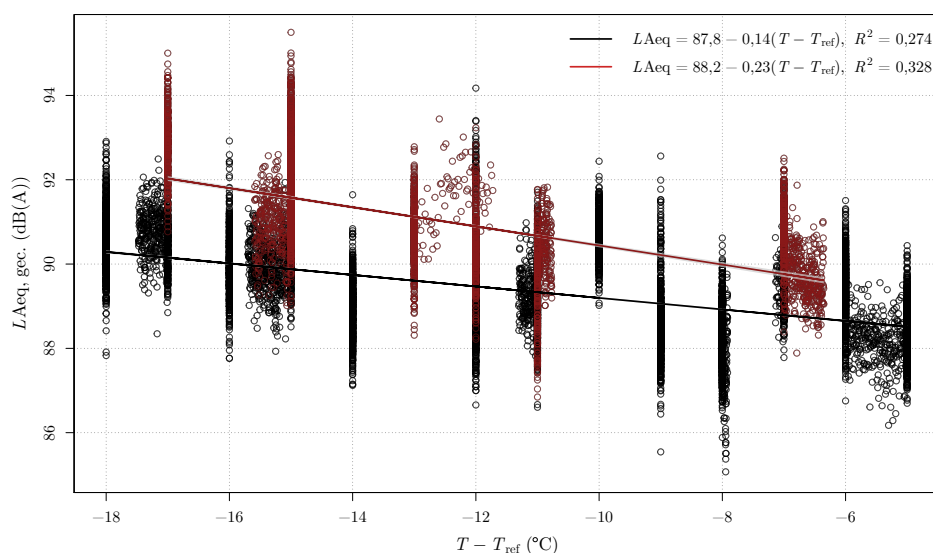
De gegevens zijn gemeten op de rechter weghelft van de A12 (Den Haag uit), tussen de hectometerpaaltjes bij km 9,0 en km 12,3. Voor dit segment wegdek is gekozen vanwege de ligging in een vrijwel open veld en om reden dat het uit één wegdektype bestaat, namelijk TZOAB. Om de invloed van temperatuur in deze relatie uit te sluiten is gekozen voor vier afzonderlijke fits bij vier verschillende meetdagen, zodat de variatie in temperatuur verwaarloosbaar is. Uit het figuur volgt een gemiddelde snelheidscoëfficiënt van (25 ± 7) dB/decade. De onnauwkeurigheid van 7 dB/decade is een benadering die bepaalt is door de partiële differentiatie van een onzekerheid in het geluidsniveau van 0,5 dB(A) en een onzekerheid in de snelheid van 4,5 km/u. Hiervoor zijn de meest gangbare waarden in de formules ingevoerd.

De volledige afleiding van de onnauwkeurigheden van de lineaire modellen is in bijlage J.3 gegeven. Voor snelheid wordt als volgt gecorrigeerd:

$$LA_{eq,gec.} = LA_{eq} - 25 \cdot \log(v/80)$$

Deze snelheidscoëfficiënt is hetzelfde als de empirisch bepaalde ISO-norm waarde van 25 dB(A)/decade [21]. De ISO-norm waarde voor TZOAB is gelijk aan die van ZOAB. Voor DAB bedraagt de ISO-norm waarde 35 dB(A)/decade.

Temperatuur Het geluidsniveau is naast snelheid ook afhankelijk van de omgevingstemperatuur. Voor het onderzoeken van deze relatie wordt het DAB wegdek op de N453 bij Waddinxveen in beide richtingen gebruikt. Dit wegdek bestaat uit één rijbaan in beide richtingen en waarbij een maximale snelheid van 80 km/h geldt. Daarbij wordt voor deze relatie het gecorrigeerde equivalente geluidsniveau gebruikt, zodat de invloed van variërende snelheden verwaarloost wordt. De voor snelheid gecorrigeerde geluidsniveaus als functie van de omgevingstemperatuur zijn in figuur 12 weergegeven.

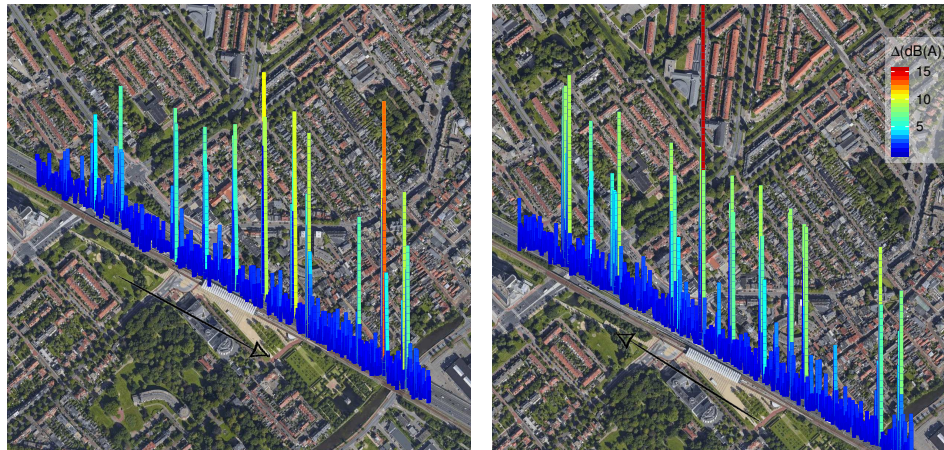


Figuur 12: Equivalent gemeten geluidsniveaus op één segment wegdek als functie van de omgevingstemperatuur.

De lage R^2 bij beide fits komt doordat de temperatuursensor enkel discrete temperatuurwaarden levert met een resolutie van 1 °C. De temperaturen tussen de gehele waarden in zijn ontstaan door interpolatie van twee opeenvolgende waarden. Uit het gemiddelde van de twee coëfficiënten wordt een temperatuurscoëfficiënt van $(-0,18 \pm 0,06)$ dB/°C berekend. Dit is binnen de onzekerheidsmarge overeenstemming aan de ISO-norm waarde voor dit wegdektype, deze is namelijk -0,14 dB/°C [22, p. 7], gebaseerd op een gemiddelde over verschillende type banden. Voor ZOAB is de ISO temperatuurscoëfficiënt gelijk aan -0,08 dB/°C. De wegdekken worden gecorrigeerd door het product van de temperatuurscoëfficiënt met $(T - T_{ref})$ af te trekken van de equivalente geluidsniveaus, waarbij T_{ref} 20 °C is.

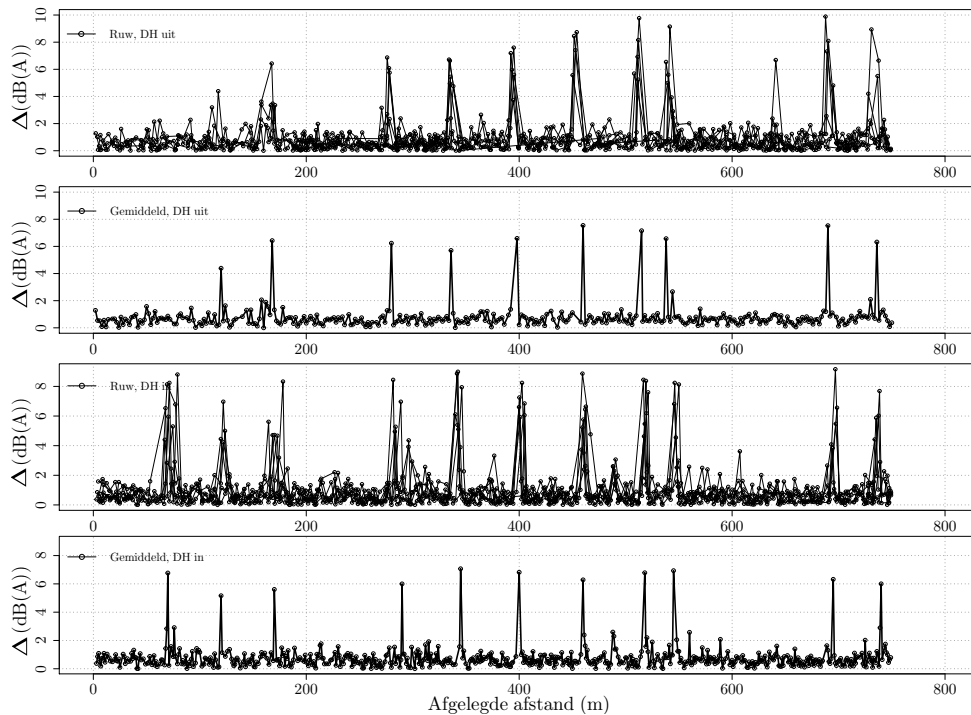
4.2.2. Dilataties A12 en van Brienoordbrug

Om dilataties te karakteriseren wordt de gecorrigeerde equivalent gewogen verschilmeting bepaald. Deze verschilmeting met symbool Δ komt tot stand door een gegeven $LA_{eq,gec}$ meting in mindering te brengen met de vorige $LA_{eq,gec}$ meting, zodat plotselinge grote oneffenheden in het wegdek, zoals dilataties, zichtbaar worden. In figuur 13 is een lengte-, breedtegraad satelliet foto gegeven van het Wilhelminaviaduct op de A12 tussen de hectometerpaaltjes bij km 4,7 en km 5,5.



Figuur 13: Gemeten dilataties op de A12. Linker figuur: Den Haag uit, Rechter figuur: Den Haag in. Pijlen geven rijrichting aan.

De dilataties op het Wilhelminaviaduct zijn van het type geluidsreducerende Nosing Joint. De pieken in het figuur vallen binnen de GPS-marge samen met de daadwerkelijke dilataties op het viaduct. In dit geval gaat het om zes passages op de rechter rijkheft (rechter figuur) en acht passages op de linker rijkheft (linker figuur). De donkerblauwe kleur, tussen dilataties in, laat zien dat het verschil in equivalent geluidsniveaus voor het gemeten asfalt tussen de 0 en circa 2 dB(A) ligt. Om de individuele gemiddelde bijdrage van elke dilatatie te bepalen wordt het wegdek opgedeeld in vlakken van 2 meter. Voor elk wegvlak wordt de gemiddelde verschilmeting bepaald. In dit geval is voor 2 meter gekozen gezien de maximale onnauwkeurigheid van de GPS van 2,5 meter [25], waardoor de metingen niet geheel samen vallen. Om stukken wegdek waarin een dilatatie zit niet te laten middelen met omringende meetpunten wordt voor deze wegvlakken enkel de verschilmetingen groter dan 4 dB(A) meegewogen. De verschilmeting van 15 dB(A) in het rechter figuur in figuur 13 wordt voor deze bewerking niet meegenomen, aangezien het hier om een uitschieter gaat die mogelijk veroorzaakt is door een atypische beweging op de dilatatie. In figuur 14 zijn de resultaten van deze bewerking weergegeven voor de verschilmetingen groter dan nul voor de weghelften Den Haag uit (bovenste twee figuren) en Den Haag in (onderste 2 figuren).



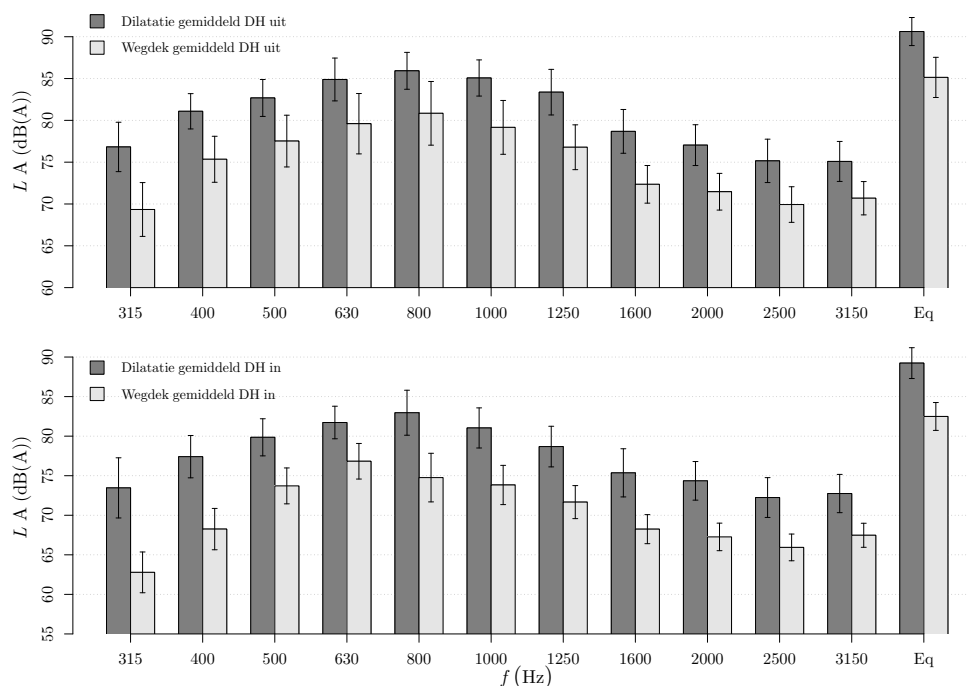
Figuur 14: Verschilmetingen equivalente geluidsniveaus Wilhelminaviaduct op de A12. Eerste en derde figuur ruwe metingen van acht passages voor respectievelijk Den Haag uit en Den Haag in. Tweede en vierde figuur gemiddelde verschilmeting van de passages per 2 meter wegvlakken.

Uit de ruwe metingen in figuur 14 blijkt dat de gemeten dilataties voor de diverse passages ongeveer op dezelfde posities vallen. Ook zijn de metingen qua ordegrrootte overeenkomstig aan elkaar. De klap van de dilatatie op de achterbanden is niet of amper waargenomen bij deze metingen. Dit komt doordat de bijdrage van het geluid op de achterbanden na geometrische uitbreiding $10\log_{10}(2,5 \text{ meter}/0,1 \text{ meter}) = 14 \text{ dB(A)}$ zwakker is, ten opzichte van het geluid van de voorband. Daarbij geldt dat bij een integratietijd van 100 ms en een snelheid van 100 km/u over een afstand gemeten wordt die overeenkomstig is aan de lengte van de auto, zodat het geluid van de achterband mogelijk samenvalt met de meting van een sample aan de voorband. Uit de figuren valt verder op de maken dat de verschilmetingen bij dilataties tussen de 4 en 8 dB(A) liggen. De gemiddelde verschilmetingen op de dilataties is (6 ± 2) en (7 ± 1) dB(A) voor respectievelijk de richting Den Haag in en Den Haag uit. Het feit dat op circa 100 meter enkel een dilatatie Den Haag in wordt waargenomen correspondeert met de werkelijke situatie, zo blijkt uit Google Maps. De oorzaak voor de verschilmeting Den Haag uit op circa 650 meter is via Google Maps niet te achterhalen. Mogelijk gaat het hier om een voegvulling op een specifieke weghelft. Dit wordt bevestigd door het feit dat deze piekwaarde eenmalig is waargenomen in één richting. Voor de verschilmeting van 3 dB(A) op zo'n 490 meter in de richting Den Haag in is via Google Maps wel achterhaalt dat het om een voegvulling gaat.

De maximale snelheid verschilt per richting. Zo is de maximale snelheid Den Haag in 80 km/u en Den Haag uit 100 km/u. Dit volgt ook uit de berekende snelheden vanuit de GPS posities. Deze zijn namelijk achtereenvolgens (80 ± 2) en (94 ± 4) km/u voor Den Haag in en uit. Dit snelheidsverschil is niet direct terug te zien in figuur 14, vanwege het gegeven dat het hier om verschildmetingen gaat, waarbij zowel het equivalente wegdek geluidsniveau verhoogd is als ook de equivalente dilatatiemeting.

Om meer inzicht te krijgen in de gemeten niveaus en het verschil tussen beide richtingen wordt het gemiddelde geluidsniveau per tertsband bepaald voor beide richtingen op het Wilhelminaviaduct.

In figuur 15 is dit A-gewogen geluidsniveau per tertsband per richting voor dilataties en regulier wegdek gegeven, inclusief gecorrigeerd equivalent geluidsniveau en standaarddeviatie.



Figuur 15: Tertsbandspectra in het bereik ($315 \text{ Hz} \leq f \leq 3150 \text{ Hz}$) voor het logaritisch gemiddelde geluidsniveau $\pm$ standaarddeviatie per dilatatie en asfalt bij respectievelijk Den Haag in ($v_{max} = 80 \text{ km/u}$) en Den Haag uit ($v_{max} = 100 \text{ km/u}$).

Het figuur laat zien dat de gecorrigeerde equivalente geluidsniveau voor het wegdek in de richting Den Haag uit hoger is dan het geluidsniveau Den Haag in. Dit kan veroorzaakt worden door een nieuwer wegdek voor de richting Den Haag in of een meer vervuild wegdek Den Haag uit, zodat de geluidsreducerende vermogens van de akoestische laag zijn afgenomen. Daarnaast blijkt uit de tertsbandwaarden dat het maximale niveau voor de richting Den Haag in één tertsband lager ligt dan in de andere richting (800 Hz om 630 Hz). De mogelijkheid bestaat dat er een nieuwer wegdek in deze richting ligt. Nieuwe wegdekken reduceren het geluidsniveau namelijk met name in het voor het gehoor meest

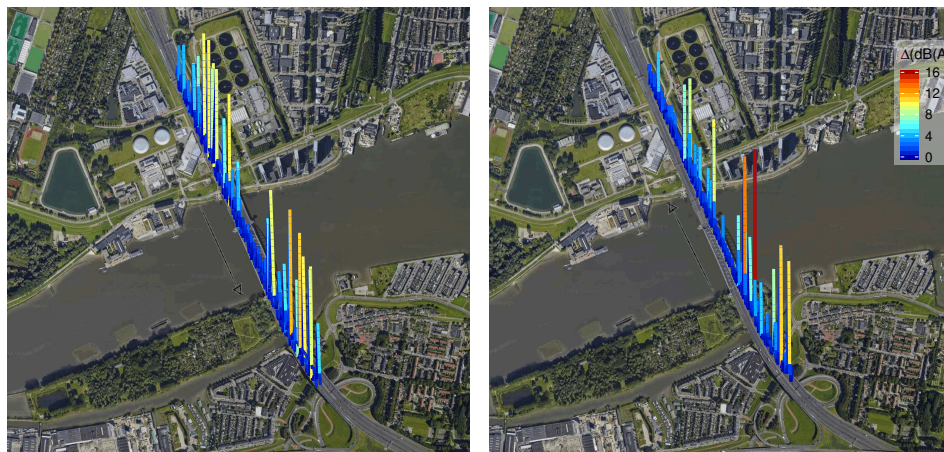
gevoelige gebied, waardoor laagfrequente niveaus dominanter worden ervaren dan in de oorspronkelijke situatie.

Het verschil in tertsband geluidsniveaus tussen de richting Den Haag in en uit is bij dilataties relatief klein ten opzichte van het verschil bij de wegdekken. Dit duidt erop dat de snelheidsafhankelijkheid van de geluidsniveaus een kleinere rol speelt bij dilataties dan bij regulier wegdek. Het vermoeden bestaat dan ook dat een hogere snelheid bij dilataties niet direct zorgt voor een evenredig hardere klap, maar dat de band wellicht minder contact maakt met de dilatatie. Dit in tegenstelling tot lagere snelheden, waarbij de banden meer vloeiend over de dilatatie geleid worden.

Formule 20 laat zien dat een toename in de omgevingstemperatuur een toename in de lengte van de dilatatieopening ten gevolge heeft. Deze toename geldt eveneens voor het geluidsniveau, immers hoe groter de opening, hoe groter de klap van de band met het wegdek. Uit de meetresultaten is echter geen correlatie gevonden tussen het geluidsniveau bij dilataties en de omgevingstemperatuur. Dit is te verklaren door de geringe toename van de opening. Na invulling in formule 20 volgt dat een toename in de opening bij een temperatuurstijging van $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ gelijk staat aan **6,0 mm**.

Voor deze berekening is een α -waarde gekozen van $0,82 \cdot 10^{-5}\text{ K}^{-1}$, gebaseerd op het type aggregaat [23]. De berekening houdt in dat bij een typische wegdek lengte van 70 meter (bepaald uit figuur 14) en een temperatuurdaling van $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ de opening met 6,0 mm afneemt. Dit blijkt niet voldoende om een toename in geluidsniveau te registreren. Een verdubbeling van de reguliere breedte van 2,0 cm (bron: BAM Infra) leidt mogelijk tot een toename in geluidsniveau. Voor een verdubbeling dient het temperatuurverschil meer dan $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ te zijn. Als het wegdek van beton zou zijn is een temperatuuroptename van $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ voldoende.

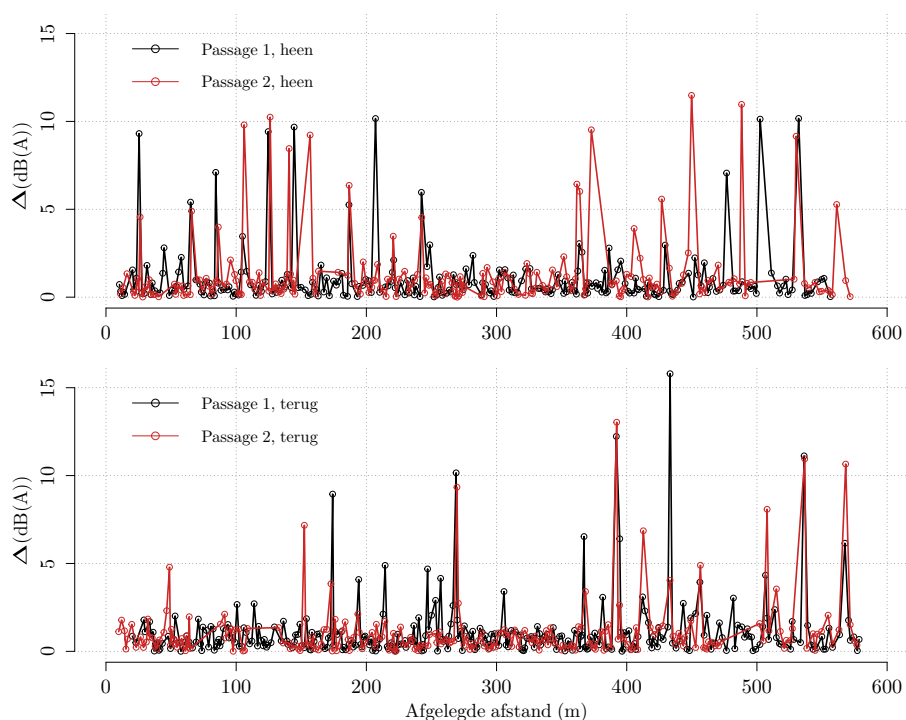
Van Brienenoordbrug: Op de van Brienenoordbrug is voor beide richtingen twee passages gemeten. De resultaten van deze metingen in een satellietfoto zijn in figuur 16 weergegeven.



Figuur 16: Gemeten dilataties op van Brienenoordbrug. De rijrichting is met de pijl aangegeven.

Het betreft hier in beide richtingen traditionele Nosing joint dilataties, met uitzondering van de val van de brug. De dilatatiespleten liggen bij deze dilataties dwars op de weg, waardoor deze in theorie hoger in geluidsniveau zijn dan de nieuwe varianten op de A12. Onder de brugoverkapping, die enigszins in de figuren boven het water te zien is, zitten geen dilataties volgens Google Maps.

Voor de snelheid geldt op deze wegdekken (97 ± 2) en (76 ± 4) km/u voor respectievelijk richting zuid (linker figuur) en richting noord (rechter figuur). Het lijkt erop dat sommige dilataties enkel in één richting worden waargenomen door de sensor, terwijl elke dilatatie doorloopt naar de andere richting. In figuur 17 zijn de metingen in beide richtingen gegeven.

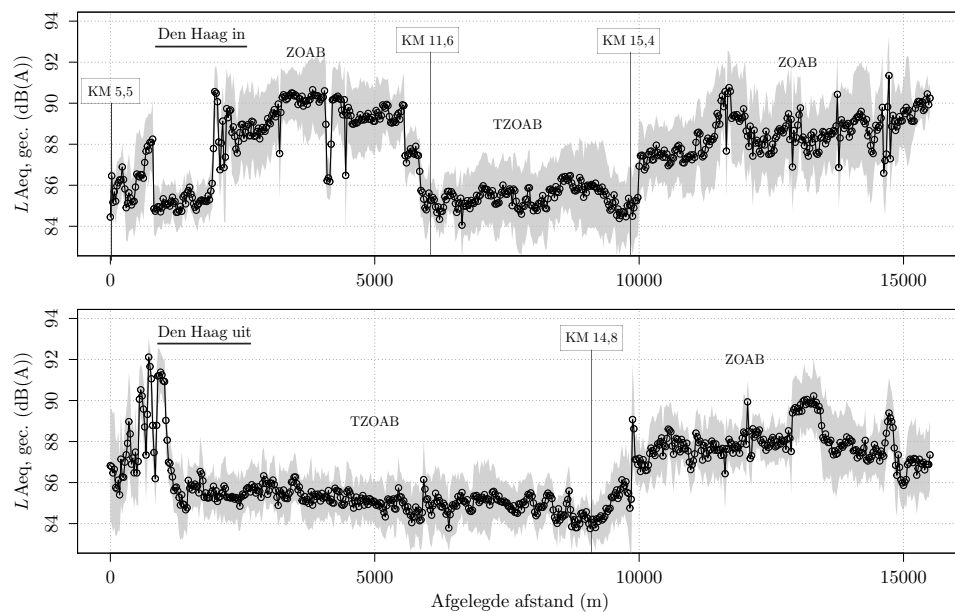


Figuur 17: Verschilmetingen op de van Brienoordbrug. Figuren zijn de ruwe metingen van twee passages in beide richtingen.

De gemiddelde verschilmetingen $\pm$ standaarddeviatie zijn (8 ± 3) dB(A) en (8 ± 2) dB(A) voor respectievelijk heen en terug. Het gemiddelde in beide richtingen is volgens verwachting hoger dan bij de dilataties op de A12, waarbij de spreiding in de metingen hier ook groter is. Het is ook mogelijk dat het wegdek op de A12 meer verouderd is dan op de van Brienoordbrug, waardoor de dilataties bij deze brug meer opvallen.

4.2.3. Wegdekken

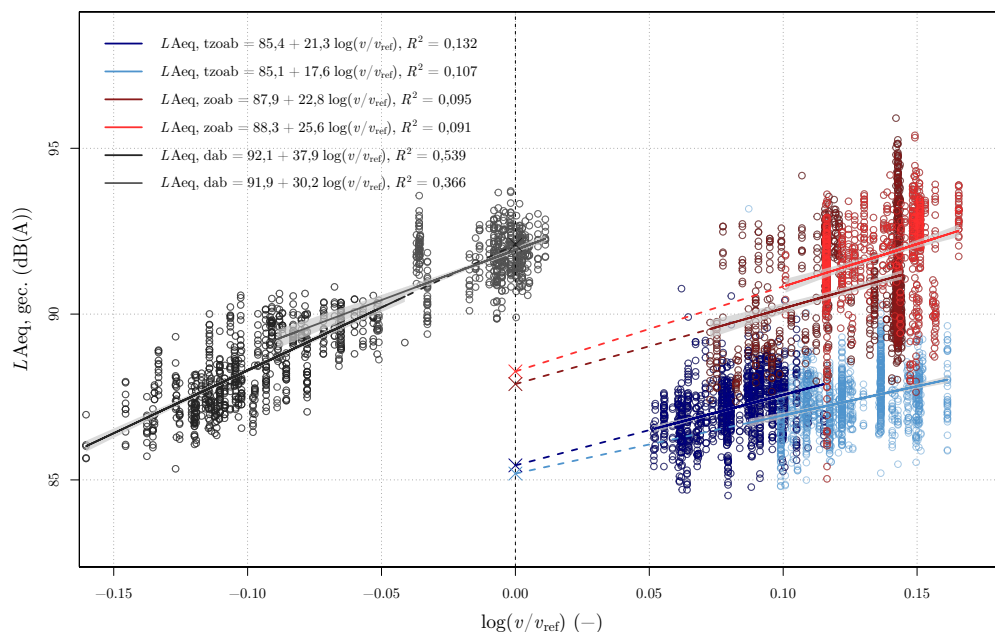
Gedurende een periode van zes weken zijn in totaal negen volledige passages gemeten in de richting van Waddinxveen naar Den Haag en twaalf volledige passages van Den Haag naar Waddinxveen. Voor beide richtingen wordt het gemiddelde algebraïsche geluidsniveau bepaald per 25 meter wegvlak. De geluidsniveaus bevatten zowel een snelheids- als temperatuurcorrectie en zijn niet-logaritmisch gemiddeld, zodat oneffenheden minder zwaar meewegen. Daarbij wordt voor beide eveneens de standaarddeviatie per wegvlak bepaald. De resultaten, met aanduiding van hectometerpaaltjes, zijn in figuur 18 opgenomen.



Figuur 18: Gemiddeld equivalent gecorrigeerd geluidsniveau per 25 meter wegvlak op de A12 vanuit Den Haag tot Waddinxveen. Bovenste figuur in de richting Den Haag, onderste figuur in de richting Waddinxveen. De grijze band rondom de punten is de standaarddeviatie per wegvlak. De KM notities zijn de werkelijke hectometerpaaltjes.

Het punt bij hectometerpaaltje km 5,5 is het einde van het Wilhelminaviaduct. Dilataties zijn dus niet meegenomen in deze berekening. De toenames in het geluidsniveau tot circa 1000 meter afgelegde weg zijn het gevolg van reflecties bij het onderdoor rijden van het knooppunt Prins Clausplein. Uit de toename in geluidsniveau is op te maken welk wegdektype op welke positie van de weg ligt. Hieruit volgt dat er in de richting Den Haag in tot hectometerpaaltje km 11,6 nog een stuk ZOAB wegdek ligt van circa 4 km. De spreiding in resultaten (standaarddeviatie) rondom de punten wordt veroorzaakt door het rijden op verschillende rijstroken en door variërende meteorologische condities. Zo levert bijvoorbeeld een nat wegdek een hoger geluidsniveau dan een droog wegdek, doordat de holtes gedeeltelijk met water gevuld raken en dus meer reflecties toestaan.

De verschillende wegdektypes (DAB, ZOAB en TZOAB) worden voor elk type op twee verschillende passages in kaart gebracht. DAB is gemeten op een circa 1,5 km lang stuk wegdek op de N453 bij Waddinxveen. De TZOAB en ZOAB wegdekken zijn gemeten op de A12 in de richting Den Haag tussen achtereenvolgens de hectometerpaaltjes km 15,4 - 11,6 en km 10,9 - 7,8. De equivalente geluidsniveaus als functie van de logaritmische snelheidsverhouding (v/v_{ref}), met temperatuurcorrectie, zijn in figuur 19 weergegeven.



Figuur 19: Equivalent geluidsniveau als functie van de logaritmische snelheidsverhouding voor de wegdektypes DAB, ZOAB en TZOAB. Met geïnterpoleerde lineaire fits en 95% betrouwbaarheidsintervallen.

De grijze balken rondom de fits zijn 95% betrouwbaarheidsintervallen en het geïnterpoleerde snijpunt met de verticale lijn op $y = 0$ is de β_0 coëfficiënt van de lineaire fits.

Bij een referentiesnelheid van 80 km/u staat deze coëfficiënt dus gelijk aan het equivalente geluidsniveau bij een snelheid van 80 km/u. Het gemiddelde van deze coëfficiënten bedraagt (92 ± 1) , (88 ± 1) en (85 ± 1) dB(A) voor respectievelijk DAB, ZOAB en TZOAB. Dit houdt in dat ZOAB en TZOAB, ten opzichte van DAB, een geluidsreductie hebben van (4 ± 2) en (7 ± 2) dB. Deze waarden zijn vergelijkbaar met de theoretische waarden beschreven in sectie 2.6.4.

De lage R^2 bij de ZOAB en TZOAB wegdekken komt vanwege het feit dat er veelal weinig variatie in snelheid is op een weg met een bepaalde maximumsnelheid. Hierdoor wordt de snelheid in discrete waarden getoond tegenover een geluidsniveau waar wel fluctuaties in zitten.

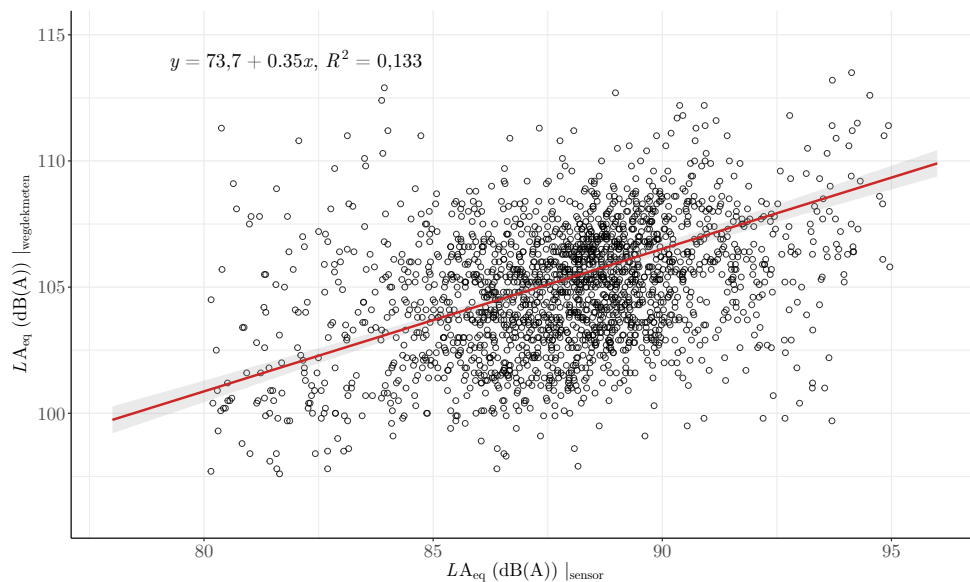
4.3. Vergelijk referentie

Om te onderzoeken hoe de metingen van de geluidssensor zich verhouden tegenover andere apparatuur worden twee vergelijkingen getroffen.

4.3.1. Wegdekmeten dataset

De eerste vergelijking wordt uitgevoerd in combinatie met een dataset van *wegdekmeten*. Wegdekmeten doet onderzoek naar de kwaliteit van wegen met behulp van camera's, lasers en microfoons. Bij deze configuratie is een goedkope geluidssensor (gevoeligheids-curve in bijlage G figuur A5) toegevoegd die één keer per seconde een equivalent A-gewogen geluidsmeting registreert.

Om een vergelijking te treffen tussen de beide sensoren worden de gegevens van de MEMS geluidssensor algebraïsch gemiddeld naar zowel één meting per seconde als naar het gemiddelde per uniek wegvlak. De beide metingen worden gekoppeld op basis van meest nabije GPS positie (lengte- en breedtegraden) met een tolerantie van $0,00005^\circ$. Deze tolerantie wordt gebruikt omdat er nooit op exact dezelfde positie is gereden en komt neer op zo'n twee meter in beide richtingen. Daarnaast zijn de enkele dilatatiemetingen, waarbij de verschilmetingen groter dan 4 dB(A) bedragen, uit beide datasets verwijderd, zodat enkel wegvlakken overblijven. Na koppeling is de totale MEMS geluidssensor dataset gereduceerd van circa 300.000 metingen naar 2048 metingen. Dit komt neer op $2048/60 \approx 34$ minuten aan gelijkwaardige data. In bijlage H figuur A6 is een GPS satelliet foto weergegeven van de overeenkomstige posities. De wegdekmeten dataset als functie van de MEMS geluidssensor dataset voor overeenkomstige posities, inclusief lineaire fit en 95% betrouwbaarheidsinterval, is in figuur 20 opgenomen.

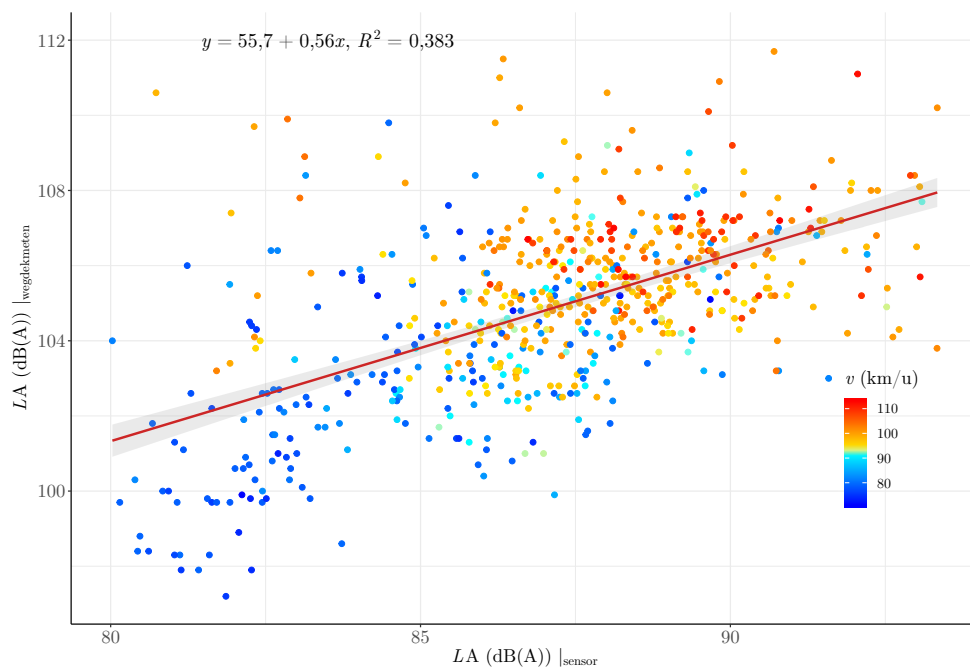


Figuur 20: Metingen van *wegdekmeten* tegenover metingen van geluidssensor voor gelijke wegen. Met lineaire fit en 95% betrouwbaarheidsinterval.

De sensor van wegdekmeten stond bij deze metingen bevestigd aan de ophanging van de auto en gericht naar de zijkant van de band. Dit levert een hoger geluidsniveau dan metingen aan de voorkant van de band, zoals bij de MEMS sensor het geval is. Het verschil in geluidsniveau komt door het gegeven dat de zijkant van de band minder stijf is dan de voorkant van de band en dat het oppervlak aan de zijkant groter is dan aan de voorkant. De band fungeert in feite als een dipool geluidsbron in de richting loodrecht aan de bewegingsrichting.

Bij deze correlatie is in eerste instantie aangenomen dat er een lineaire relatie bestaat tussen de afstraling naar de zijkant en de afstraling naar voren van een band. Daarbij is eveneens aangenomen dat er een vaste verhouding bestaat tussen de gegevens van de MEMS sensor (gemeten vóór de linker voorband van een elektrische auto) en de gegevens van wegdekmeten (gemeten met een dieselsbus aan de zijkant van de linker voorband). De gegevens voor beide zijn de ongecorrigeerde waarden. Uit de resultaten blijkt een zeer lage correlatie tussen beide metingen. Dit komt mede door het mogelijke verschil in snelheid.

De geluidsniveaus worden derhalve op gelijkwaardige snelheid gefilterd door de absolute waarde van het verschil tussen de snelheden groter dan 5 km/u niet mee te laten wegen. De resultaten van deze bewerking zijn zichtbaar in figuur 21.



Figuur 21: Metingen van *wegdekmeten* tegenover metingen van geluidssensor voor gelijke wegen en met gelijkwaardige snelheid. Met lineaire fit en 95% betrouwbaarheidsinterval.

Uit het figuur blijkt dat deze bewerking bijdraagt aan de kwaliteit van de lineaire fit. De correlatiecoëfficiënt stijgt van 0,133 naar 0,383. De nog steeds lage correlatie is deels het gevolg van het feit dat de wegdekmeten dataset minder recent is dan de MEMS

geluidsdata. Dit houdt in dat wegdekken verouderd zijn en dus een toename in de geluidsniveaus registreren. Ook geldt dat het verschil in type band en bandenspanning bijdraagt aan een niet gelijkwaardige verspreiding van het geluid.

Verder gelden de volgende mogelijke oorzaken voor de lage correlatie:

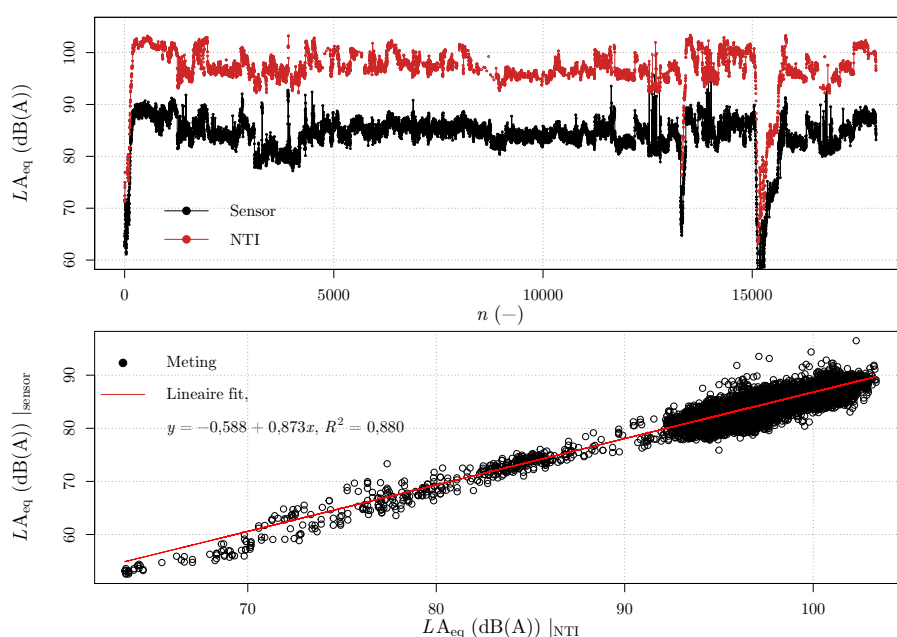
- Het kan zo zijn dat wegdekken tussentijds vervangen zijn, waardoor de geluidsniveaus zijn gezakt.
- Op basis van de huidige gegevens kan geen vaste verhouding tussen de afstraling van het geluid bij verschillende voertuigen aangenomen worden.

4.3.2. Simultaan meet aanhanger

De tweede vergelijking wordt simultaan verricht in combinatie met de ISO gecertificeerde meet aanhanger. Voor deze vergelijking is de geluidssensor bevestigd op de meet aanhanger vóór de linkerband. In bijlage I figuur A7 is een foto van het bovenaanzicht gegeven met de geluidssensor en microfoons. De middelingsfrequentie van de geluidssensor wordt voor deze meting gelijk gesteld aan die van de NTI, namelijk 8 metingen per seconde. Voor de gecertificeerde metingen geldt dat tijdens het rijden het logaritmische gemiddelde van de beide NTI microfoons wordt bepaald.

De gegevens zijn gemeten op de A12 vanaf Gouda, met daarbij vier passages over het Wilhelminaviaduct. Beide systemen zijn op nagenoeg dezelfde tijd gestart, zodat deze op basis van meest overeenkomstige tijd (met een tolerantie van 100 ms) gekoppeld kunnen worden. Na analyse blijkt dat de geluidssensor iets in de tijd voorloopt op de NTI.

Om de optimale correlatie te vinden worden de beide metingen ten opzichte van elkaar in de tijd verschoven. De maximale waarde van de correlatiecoëfficiënt (R^2) wordt hierbij als maatgevend aangenomen. Deze maximale R^2 blijkt bij een verschuiving van 26 in de tijd (3,25 seconden) te zijn (zichtbaar in bijlage I figuur A8). De resultaten voor de equivalent gemeten geluidsniveaus van beide systemen is in figuur 22 gegeven. Het bovenste figuur laat de ruwe data als functie van het aantal meetpunten zien. Het onderste figuur geeft de sensor metingen als functie van die van de NTI weer, met daarbij de lineaire fit.

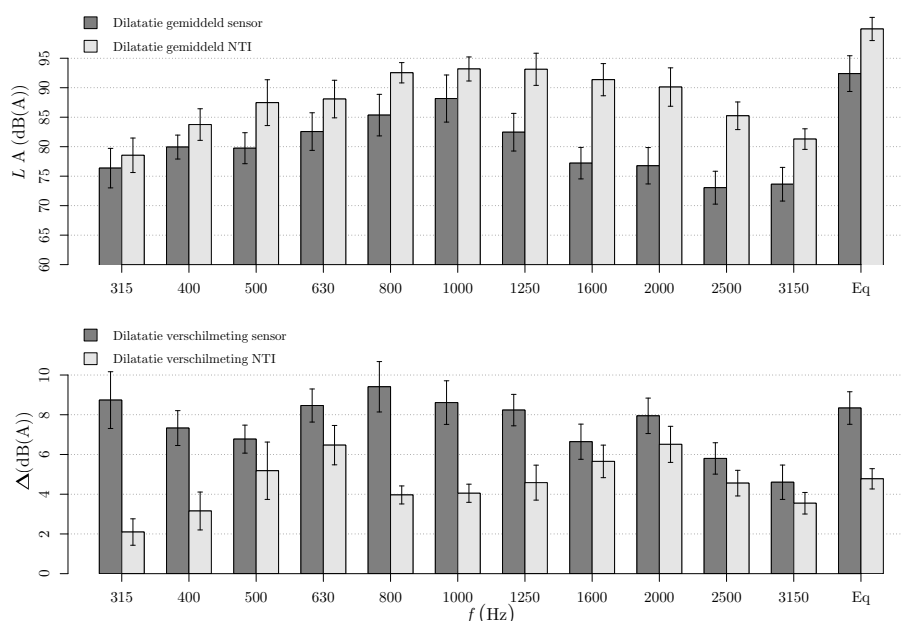


Figuur 22: Resultaten simultane CPX metingen van geluidssensor en NTI microfoons. Bovenste figuur lopende ruwe meetdata als functie van het aantal meetpunten. Onderste figuur lineaire relatie tussen beide.

Het figuur laat zien dat de resterende data in hoge mate overeen komt met de resultaten van de geluidssensor. Dit blijkt ook uit de R^2 van 0,880.

De richtingscoëfficiënt, de verhouding tussen $LA_{eq}|_{\text{sensor}}$ en $LA_{eq}|_{\text{NTI}}$, staat in dit geval gelijk aan de verhouding tussen de afstraling van het geluid naar de zijkant en naar voren, mits het model vanuit de oorsprong begint. Bij een regressiemodel vanuit de oorsprong, staat deze verhouding namelijk gelijk aan het gehele meetbereik van de y -as gedeeld door het gehele meetbereik op de x -as. De coëfficiënt in het huidige model bedraagt 0,873, zo blijkt uit het figuur. Als het model geforceerd wordt vanuit de oorsprong te beginnen zakt de waarde naar 0,868. Hieruit kan dus bepaald worden dat de verhouding voor dit type band en met de huidige configuratie aan meetinstrumenten gelijk staat aan 0,868. De benaderde onnauwkeurigheid van deze coëfficiënt bedraagt 0,009.

Voor de dilatatie op de A12 is het gemiddelde geluidsniveau per tertsbands voor de sensor en NTI bepaald. De resultaten zijn in het bovenste figuur in figuur 23 opgenomen. Het onderste figuur toont de gemiddelde verschilmetingen per tertsbands op de elf gemeten dilatatie. De onnauwkeurigheidsbalken in het onderste figuur worden vanwege de hoge standaarddeviatie gegeven door de standaardfout ($\sigma/\sqrt{11}$).



Figuur 23: Bovenste figuur: tertsbandspectrum $\pm$ standaarddeviatie geluidssensor en NTI voor dilatatiemetingen. Onderste figuur: gemiddelde verschilmetingen per tertsbands voor beide systemen. Onnauwkeurigheidsbalken zijn hierbij standaardfout ($\sigma/\sqrt{n}$).

Het figuur toont aan dat voor elke tertsbands de gemiddelde verschilmeting bij de sensor hoger is dan voor de NTI, terwijl het gemiddelde geluidsniveau van de NTI nog steeds hoger ligt dan voor de sensor. Dit houdt in dat een dilatatie meer opvalt bij de afstraling van het geluid naar voren dan de afstraling naar de zijkant. Hieruit kan worden opge- maakt dat de verhouding tussen het afgestraalde geluid naar voren en naar de zijkant bij een dilatatie dicht bij 1 ligt, in tegenstelling tot regulier asfalt.

5. Conclusie

In dit onderzoek is gezocht naar een antwoord op de vragen:

1. In hoeverre zijn goedkope geluidssensoren in staat om gevalideerde metingen te verrichten, ten opzichte van referentieapparatuur?
2. Van welke factoren is de hoogte van het geluidsniveau bij dilatatievoegen afhankelijk en blijkt dit ook uit de resultaten van de geluidssensor?

Om dit te onderzoeken is een sensor systeem ontwikkeld dat variaties in atmosferische druk omzet naar A-gewogen tertsbanden. Naast een geluidssensor is ook een temperatuursensor en GPS aan het systeem toegevoegd. De gevoeligheid, lineariteit en richtingsafhankelijkheid van de geluidssensor zijn onder gecontroleerde condities onderzocht en vergeleken met referentieapparatuur. Na ijking van het systeem is deze gedurende een periode van circa zes weken gemonteerd geweest onder een auto om de band en wegdek geluidsniveaus in kaart te brengen.

Uit de resultaten van de gecontroleerde meetsessies blijkt dat de geluidssensor in tertsbanden groter dan 200 Hz en kleiner dan 2000 Hz een lineaire gevoeligheid vertoont. De resultaten van witte ruismetingen bij twee geluidssensoren van hetzelfde type hebben aangetoond dat de sensoren nagenoeg met elkaar overeenkomen, waarbij een R^2 van 0,9996 naar voren is gekomen. De geluidssensor is na onderzoek niet geheel omnidirectioneel gebleken. Bij een rotatie van 180° ten opzichte van de bewegingsrichting van het geluid nam de gevoeligheid met bijna 2 dB(A) af.

Bij metingen aan een tweelaags zeer open asfaltbeton wegdek is een gemiddelde snelheidscoëfficiënt van (24 ± 7) dB(A)/decade bepaald. Voor een dicht asfaltbeton wegdek is een gemiddelde temperatuurcoëfficiënt van $(-0,18 \pm 0,06)$ dB/ $^\circ\text{C}$ naar voren gekomen. Beide zijn binnen de onzekerheidsmarge overeenkomstig aan de ISO-norm vastgestelde waarden. Voor zeer open asfaltbeton en tweelaags zeer open asfaltbeton is een geluidsreductie vastgesteld van (4 ± 2) en (7 ± 2) dB(A) ten opzichte van dicht asfaltbeton. Deze waarden zijn vergelijkbaar aan de theoretische reducties.

Uit de metingen aan dilatatievoegen is een gemiddelde toename bovenop het aanwezige geluidsniveau geregistreerd van (6 ± 2) en (8 ± 3) dB(A) voor achtereenvolgens het Wilhelminaviaduct op de A12 en de van Brienenoordbrug. In beide gevallen zijn deze waarden hoger dan de toelaatbare toenames van maximaal 5 dB(A).

Daarnaast is uit de analyse van tertsbanden aangetoond dat dilataties niet dominant voorkomen in een specifieke tertsband. Daarbij is gebleken dat de verhouding van het afgestraalde geluid naar voren en naar de zijkant bij dilataties dichter bij 1 ligt, dan voor regulier asfalt het geval is.

Bij een lineaire relatie met een bestaande dataset van een vergelijkbare sensor van een ander voertuig is een lage correlatie tussen de sensoren gevonden. De R^2 is hierbij 0,383. Hieruit wordt geconcludeerd dat er geen vaste verhouding aangenomen kan worden tussen het afgestraalde geluid bij twee verschillende voertuigen.

Bij een simultane meting met gecertificeerde meetapparatuur is een sterke onderlinge lineaire correlatie gevonden. De R^2 bedraagt bij deze relatie 0,880. De verhouding van de afstraling van het geluid bij een band naar voren en de afstraling naar de zijkant is in dit geval $(0,868 \pm 0,009)$.

Uit dit onderzoek is de conclusie dat goedkope geluidssensoren zeer goed in staat zijn om metingen van geavanceerde meetapparatuur te volgen. Daarnaast kan uit de dilatatiemetingen geconcludeerd worden dat een verandering in temperatuur van 10 °C niet bijdraagt aan een verhoging van het geluidsniveau en dat snelheidsafhankelijkheid van minder belang is dan voor regulier asfalt geldt.

6. Aanbevelingen

Uit het onderzoek is naar voren gekomen dat een ontworpen systeem van goedkope sensoren zeer goed in staat is metingen te leveren die overeenkomstig zijn aan gevalideerde apparatuur. Voor een vervolgonderzoek ligt in het koppelen van de gegevens van de diverse sensoren aan elkaar en de gelijktijdige inzet van meerdere systemen mogelijkheden tot verbetering.

In de huidige situatie worden drie afzonderlijke CSV bestanden door de Raspberry Pi gecreëerd. Deze zijn bedoelt voor het opslaan van de audio, temperatuur en GPS gegevens. De bestanden worden uitgelezen en vervolgens op basis van meest nabije tijd aan elkaar gekoppeld en geïnterpoleerd. In een vervolgonderzoek is het wenselijk om het zodanig te programmeren dat alle gegevens in één bestand opgeslagen liggen en dat de Raspberry Pi pas begint met het opslaan van de gegevens als de GPS verbinding heeft gevonden.

Een tweede verbetering ligt in het gebruik van een temperatuursensor met een hogere resolutie, zodat de onnauwkeurigheid in lineaire relaties tussen de temperatuur en het geluidsniveau afneemt en er met een hogere nauwkeurigheid gecorrigeerd kan worden voor verandering in temperatuur.

Een derde verbetering van de dataverwerking is om het systeem uit te rusten met een USB dongle of router zodat de Raspberry Pi niet na elke run met de computer verbonden moet zijn om de gegevens te verkrijgen, maar in plaats daarvan de gegevens naar een database verstuurd.

In een vervolgonderzoek kan daarnaast ingezet worden op het gelijktijdig gebruik van meerdere systemen, zodat meer data beschikbaar komt en de kwaliteit van de resultaten toeneemt. Ook is bij het huidige onderzoek (langdurig) gemeten onder één type band. Voor een vergelijkende analyse is het interessant om de resultaten te vergelijken met diverse type banden.

Referenties

- [1] Jeroen Devilee, Eveline Maris, and Irene van Kamp. De maatschappelijke betekenis van geluid. *RIVM rapport 815120004*, 2010.
- [2] Wet Geluidhinder. <https://wetten.overheid.nl/BWBR0003227/2017-05-01>. [Online; bezocht 13-11-2018].
- [3] CBS motorvoertuigenpark. <http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?DM=SLNL&PA=7374hvv&D1=2-11&D2=0&D3=a&HDR=T&STB=G2%2cG1&VW=T>. [Online; bezocht 13-11-2018].
- [4] ZOAB. <https://www.rijkswaterstaat.nl/wegen/wegbeheer/aanleg-wegen/zoab.aspx>. [Online; bezocht 14-12-2018].
- [5] R Development Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2008. ISBN 3-900051-07-0.
- [6] Yang-Hann Kim. *Sound propagation: an impedance based approach*. John Wiley & Sons, 2010.
- [7] Heinrich Kuttruff. *Acoustics: an introduction*. CRC Press, 2006.
- [8] ISO 3741:2010. <https://www.iso.org/standard/52053.html>. [Online; bezocht 13-11-2018].
- [9] Inventory study of basic knowledge on tyre/road noise. <http://www.infrageluid.nl/leaflets/Inventory%20Study.pdf>. [Online; bezocht 21-11-2018].
- [10] Gijsjan Blokland. Weg-, rail- en vliegverkeerslawaaï. 2017.
- [11] Gijsjan Blokland. Industrielawaaï. 2009.
- [12] Ulf Sandberg and Jerzy Ejsmont. Tyre/road noise. reference book. 2002.
- [13] K Schaaf, D Ronneberger, and P Neuwald. Noise of a rolling tire-flow and pressure variations in the region of the contact patch. In *INTROC 90-International Tire/Road Noise Conference 1990, Gothenburg, Sweden*, 1990.
- [14] Klaus Schaaf. Noise radiation from rolling tire-sound amplification by the horneffect. *Proc. Inter-Noise 82*, pages 131–134, 1982.
- [15] Ard Kuijpers and Gijsjan Van Blokland. Tyre/road noise models in the last two decades: a critical evaluation. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, volume 2001, pages 2494–2499. Institute of Noise Control Engineering, 2001.
- [16] Ulf Sandberg. The multi-coincidence peak around 1000 hz in tyre/road noise spectra. In *Euronoise Conference, paper ID*, volume 498. Citeseer, 2003.

- [17] Richtlijn dunne asfaltdekklagen. <http://www.asfaltblij.nl/media/1613/richtlijn-dunne-asfalt-deklagen.pdf>. [Online; bezocht 14-12-2018].
- [18] Zdzisław Pluta and Tadeusz Hryniewicz. Thermal expansion of solids. *Journal of Modern Physics*, 3(08):793, 2012.
- [19] Stille Voegovergangen Gezocht! http://www.joostdevree.nl/bouwkunde2/jpgv/voegovergang_95_stille_voegovergangen_gezocht_tollenaar_en_van_loon_www_mp_nl.pdf. [Online; bezocht 16-11-2018].
- [20] MEMS: Microelectromechanical Systems. <https://courses.cs.washington.edu/courses/cse466/15au/pdfs/lectures/MEMS%20Sensors.pdf>. [Online; bezocht 08-11-2018].
- [21] CD ISO. 11819-2. Acoustics–Method for Measuring the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise–Part 2: The Close Proximity Method. *International Organisation for Standardisation (ISO), Geneve, Switzerland*, 2000.
- [22] CD ISO. ISO/TS 11819-3:2017. Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 3: Reference tyres. *International Organisation for Standardisation (ISO), Geneve, Switzerland*, 2017.
- [23] Yusuf A Mehtal, Donald W Chrislensen, and Shelley M Stoffels. Determination of Coefficient of Thermal Contraction of Asphalt Concrete Using Indirect Tensile Test Hardware. 1999.
- [24] NTI Audio: Technical Data XL2. <https://www.nti-audio.com/Portals/0/data/en/XL2-Specifications.pdf>. [Online; bezocht 01-11-2018].
- [25] Sparkfun GP-20U7 GPS Module. <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/GPS/GP-20U7.pdf>. [Online; bezocht 11-12-2018].

7. Bijlage

A. Afleiding akoestische golfvergelijking

Uitgaande van formule 3:

$$(pA)_x - (pA)_{x-\Delta x} = \rho A \frac{du}{dt} \Delta x$$

De verandering van de snelheid van het fluïdumdeeltje over de tijd wordt gegeven door:

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \quad (23)$$

Voor de limiet $\Delta x \rightarrow 0$ in formule 3 geldt dat:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) = \rho \frac{Du}{Dt} \quad (24)$$

Hierin is $\frac{Du}{Dt}$ de totale differentiaal, gegeven door $\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x}$.

Bij relatief constante statische druk p_0 en dichtheid ρ_0 wordt formule 24 bepaald door:

$$-\frac{\partial p'}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} \quad (25)$$

De relatie tussen de dichtheid van een materiaal en de snelheid van het fluïdumdeeltje volgt uit de wet van behoud van massa. Hiervoor geldt dat de verandering in massa voor het infinitesimaal kleine element gelijk staat aan de afname van massa in het fluïdum tussen x en Δx . Dit levert:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho A \Delta x) = (\rho u A)_x - (\rho u A)_{x+\Delta x} \quad (26)$$

Als aangenomen wordt dat de dwarsdoorsnede A constant blijft en ρ gegeven wordt door $\rho = \rho_0 + \rho'$, dan geldt voor de massabalans:

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} = -\rho_0 \frac{\partial u}{\partial x} \quad (27)$$

Na elimineren van ρ' en u uit formules 25 en 27 en het gegeven dat $c^2 = \frac{\kappa}{\rho} = \frac{v'}{\rho'}$ volgt de akoestische golfvergelijking in één dimensie:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

B. Fourierreeks

De fourieranalyse is een wiskundige techniek om een periodiek signaal uit te drukken als de sommatie van harmonische oscillaties.

Neem de functie $f(t)$, waarvoor geldt dat deze periodiek is met een periode T :

$$f(t + T) = f(t) \quad (28)$$

Als aangenomen wordt dat de periode T gelijk is aan 2π , dan kan de functie $f(t)$ op het interval $[-\pi, \pi]$ onderverdeeld worden in de som van een oneindig aantal harmonische oscillaties; de fourierreeks, [7, p. 23]:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(nt) + b_n \sin(nt)] \quad (29)$$

waarin:

a_0	fourierconstante	(-)
a_n, b_n	fouriercoëfficiënten	(-)
n	orde	(-)

De fourierconstante a_0 en coëfficiënten a_n en b_n worden bepaald door:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) dt \quad (30a)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cos(nt) dt \quad (30b)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \sin(nt) dt \quad (30c)$$

Voor de complexe fourierreeks notatie wordt de formule van Euler gebruikt om het verband tussen goniometrische en complex exponentiële functies aan te duiden. In formulevorm de formule van Euler, met sinus en cosinus notatie:

$$e^{it} = \cos(t) + i \cdot \sin(t) \quad (31a)$$

$$\rightarrow \sin(t) = \frac{e^{it} - e^{-it}}{2i} \quad (31b)$$

$$\rightarrow \cos(t) = \frac{e^{it} + e^{-it}}{2} \quad (31c)$$

Substitutie van formules 31b en 31c in formule 29 levert:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \frac{e^{int} - e^{-int}}{2} + b_n \frac{e^{int} + e^{-int}}{2i} \right] \quad (32)$$

Met versimpelde notatie:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_n e^{in\omega t} \quad (33)$$

Waarbij de X_n coëfficiënt op het interval $[0, T]$ gegeven is door:

$$X_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{in\omega t} dt \quad (34)$$

B.1. Fouriertransformatie

Voor niet-periodieke functies en signalen met een continu spectrum is het niet mogelijk deze om te zetten naar fourierreksen, aangezien de som van de reksen geen gehele veelvoud zijn van $1/T$. De fouriertransformatie van $f(x)$ door $T \rightarrow \infty$ te nemen is gegeven door:

$$\mathcal{F}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (35)$$

C. Python Code

C.1. Aansturing geluidssensor

```

1 import sys
2 import pyaudio
3 from struct import unpack
4 import numpy as np
5 import datetime
6 import pandas as pd
7 from numpy import pi, convolve
8 from scipy.signal.filter_design import bilinear
9 from scipy.signal import lfilter
10
11 matrix = np.repeat(0,29)
12 power = []
13
14 #Octaaf banden met boven en ondergrens
15 f_o = np.array([16,31.5,63,125,250,500,1000,
16               2000,4000,8000])
17
18 f_oo = np.array([22,44,88,176,354,707,1414,2828,5656])
19
20 f_ob = np.array([44,88,176,354,707,1414,2828,5656,11300])
21
22 #Tertsbanden met boven en ondergrens
23 f_0 = np.array([20,25,31.5,40,50,
24               63,80,100,125,160,200,
25               250,315,400,500,630,800,
26               1000,1250,1600,2000,2500,
27               3150,4000,5000,6300,8000,
28               10000,12500])
29
30 def fogrens(f_0):
31     return f_0/(2**(float(1)/float(6)))
32
33 def fbgrens(f_0):
34     return f_0*(2**(float(1)/float(6)))
35
36 df = pd.DataFrame(data= {'f_o': fogrens(f_0),'f_0': f_0,'f_b': fbgrens(f_0)})
37
38
39
40 def list_devices():
41     # List all audio input devices
42     p = pyaudio.PyAudio()
43     i = 0
44     n = p.get_device_count()
45     while i < n:
46         print p.get_device_info_by_index(i)
47         print '\r\r'
48         dev = p.get_device_info_by_index(i)
49         if dev['maxInputChannels'] > 0:
50             print str(i)+'\r\r'+dev['name']
51         i += 1
52
53 if __name__ == '__main__':
54     list_devices()
55
56 # Audio
57 no_channels = 2
58 sample_rate = 48000

```



```

59 p = pyaudio.PyAudio()
60 chunk = 4800
61 device = 2
62
63 p = pyaudio.PyAudio()
64 stream = p.open(format = pyaudio.paInt32,
65                 channels = no_channels,
66                 rate = sample_rate,
67                 input = True,
68                 frames_per_buffer = chunk,
69                 input_device_index = device)
70
71
72 #filter A-weging
73 def a_weighting_coeffs_design(sample_rate):
74     f1 = 20.598997
75     f2 = 107.65265
76     f3 = 737.86223
77     f4 = 12194.217
78     A1000 = 1.9997
79     numerators = [(2*pi*f4)**2 * (10**(A1000 / 20.0)), 0., 0., 0., 0.];
80     denominators = convolve(
81         [1., +4*pi * f4, (2*pi * f4)**2],
82         [1., +4*pi * f1, (2*pi * f1)**2]
83     )
84     denominators = convolve(
85         convolve(denominators, [1., 2*pi * f3]),
86         [1., 2*pi * f2]
87     )
88     return bilinear(numerators, denominators, sample_rate)
89
90 def piff(val):
91     return int(2*chunk*val/sample_rate)
92
93 def calculate_levels(data, chunk, sample_rate):
94     global matrix
95     b, a = a_weighting_coeffs_design(sample_rate)
96     data = lfilter(b,a,data)
97     data = data * np.hanning(len(data))
98     # FFT
99     fourier=np.fft.rfft(data)
100    fourier=np.delete(fourier,len(fourier)-1)
101    # Gemiddelde Amplitude voor frequenties in bereik
102    power = np.abs(fourier)
103    for i in range(0,29):
104        matrix[i] = (int(np.sum(power[piff(df['f_o'])[i]] : piff(df['f_b'])[i]+1]))
105        /2**32.
106    matrix = 20*np.log10(np.divide(matrix*2 ,np.sum(np.hanning(len(data)))))
107
108    return matrix
109
110 with open("/home/pi/audio.csv", "a") as f:
111     f.write("Begin meting,{ }\n".format(datetime.datetime.now()))
112
113 if __name__ == '__main__':
114     # While loop zolang audio fragment bestaat:
115     while 1:
116         try:
117             # Get microphone data
118             data = np.fromstring(stream.read(chunk), dtype=np.int32)
119             matrix=calculate_levels(data, chunk, sample_rate)
120             print(round((matrix[18]+108.),2), datetime.datetime.now().time())

```

```

120     with open("/home/pi/audio.csv", "a") as f:
121         f.write('{}',{},{},{},{},{},{},{},{},{},{},{},{},{},{},{},
122             '{}',{},{},{},{},{},{},{},{},{},{},{},{},{},{},{},\n'.
123             format(round(matrix[0],2),round(matrix[1],2), round(matrix[2],2),
124                 round(matrix[3],2), round(matrix[4],2), round(matrix[5],2), round(matrix
125                     [6],2),
126                 round(matrix[7],2), round(matrix[8],2), round(matrix[9],2), round(matrix
127                     [10],2),
128                 round(matrix[11],2), round(matrix[12],2), round(matrix[13],2), round(
129                     matrix[14],2),
130                 round(matrix[15],2), round(matrix[16],2), round(matrix[17],2), round(
131                     matrix[18],2),
132                 round(matrix[19],2), round(matrix[20],2), round(matrix[21],2), round(
133                     matrix[22],2),
134                 round(matrix[23],2), round(matrix[24],2), round(matrix[25],2), round(
135                     matrix[26],2),
136                 round(matrix[27],2), round(matrix[28],2), datetime.datetime.now()))
137     except KeyboardInterrupt:
138         print("Ctrl-C Terminating...")
139         stream.stop_stream()
140         stream.close()
141         p.terminate()
142         sys.exit(1)
143     except Exception, e:
144         print(e)
145         print("ERROR Terminating...")
146         stream.stop_stream()
147         stream.close()
148         p.terminate()
149         sys.exit(1)

```

Geluidssensor.py

C.2. Aansturing GPS

```

1 import gps
2 import dateutil.parser
3 import datetime
4
5 info = {'mode':0,
6         'gpstime':'',
7         'latitude':0,
8         'longitude':0,
9         'altitude':0,
10        'speedkm':0,
11        'satellites':0,
12        'satellites_used':0}
13
14 gpsobj = gps.gps() ;
15 gpsobj.stream(gps.WATCH_ENABLE | gps.WATCH_NEWSTYLE)
16
17 with open("/home/pi/gps.csv", "a") as f:
18     f.write("\n")
19     f.write("Begin meting,{ }\n".format(datetime.datetime.now()))
20
21 try:
22     while True:
23         try:
24             gpsdat = gpsobj.next()
25             if gpsdat['class'] == 'TPV':

```

```

26         if hasattr(gpsdat, 'time'):
27             nix_time = dateutil.parser.parse(gpsdat.time)
28             info['gpstime'] = str(nix_time)
29         if hasattr(gpsdat, 'mode'): info['mode'] = int(gpsdat.mode)
30         if hasattr(gpsdat, 'lat'): info['latitude'] = float(gpsdat.lat)
31         if hasattr(gpsdat, 'lon'): info['longitude'] = float(gpsdat.lon)
32         if hasattr(gpsdat, 'alt'): info['altitude'] = float(gpsdat.alt)
33         if hasattr(gpsdat, 'speed'): info['speedkm'] = float(gpsdat.speed)
34     if hasattr(gpsdat, 'satellites'):
35         satellites_used = 0
36         for sat in gpsdat.satellites:
37             if hasattr(sat, 'used'):
38                 if sat.used:
39                     satellites_used += 1
40         info['satellites'] = len(gpsdat.satellites)
41         info['satellites_used'] = satellites_used
42
43     with open("/home/pi/gps.csv", "a") as f:
44         f.write("{}{}\n".format(str(info.values()).strip('[]'), str(datetime
45             .datetime.now())))
46         f.write("\n")
47
48     except KeyError:
49         pass
50     except StopIteration:
51
52         gpsobj = gps.gps()
53         gpsobj.stream(gps.WATCH_ENABLE | gps.WATCH_NEWSTYLE)
54
55 except KeyboardInterrupt:
56     gpsobj.stream(gps.WATCH_DISABLE)

```

GPS.py

C.3. Aansturing temperatuursensor

```

1 import Adafruit_DHT
2 import datetime
3
4 with open("/home/pi/dht.csv", "a") as f:
5     f.write("\n")
6     f.write("Begin meting,{}\n".format(datetime.datetime.now()))
7
8
9 while True:
10
11     humidity, temperature = Adafruit_DHT.read_retry(11, 4)
12     with open("/home/pi/dht.csv", "a") as f:
13         f.write('{}{}\n'.format(temperature, humidity, datetime.datetime.now()))

```

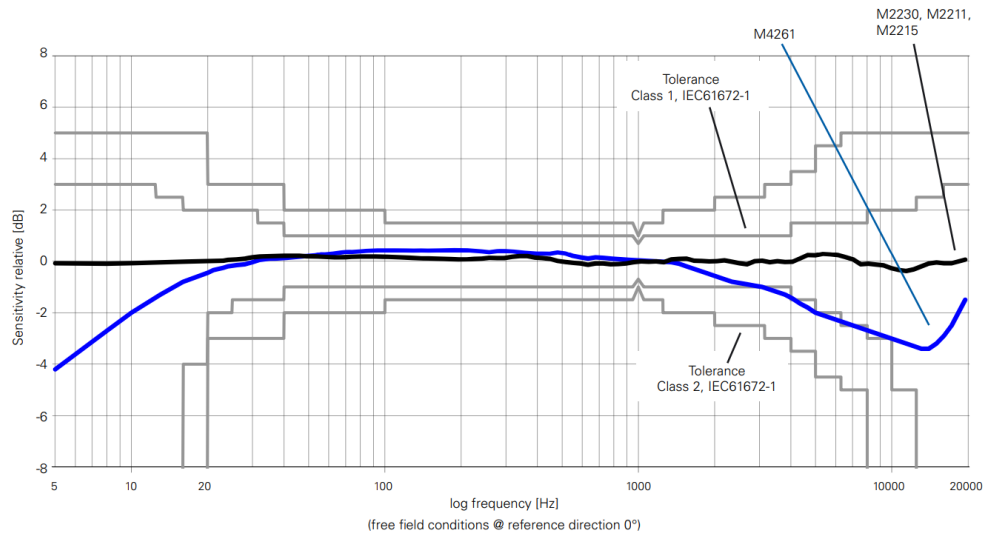
Temperatuursensor.py

D. CPX auto



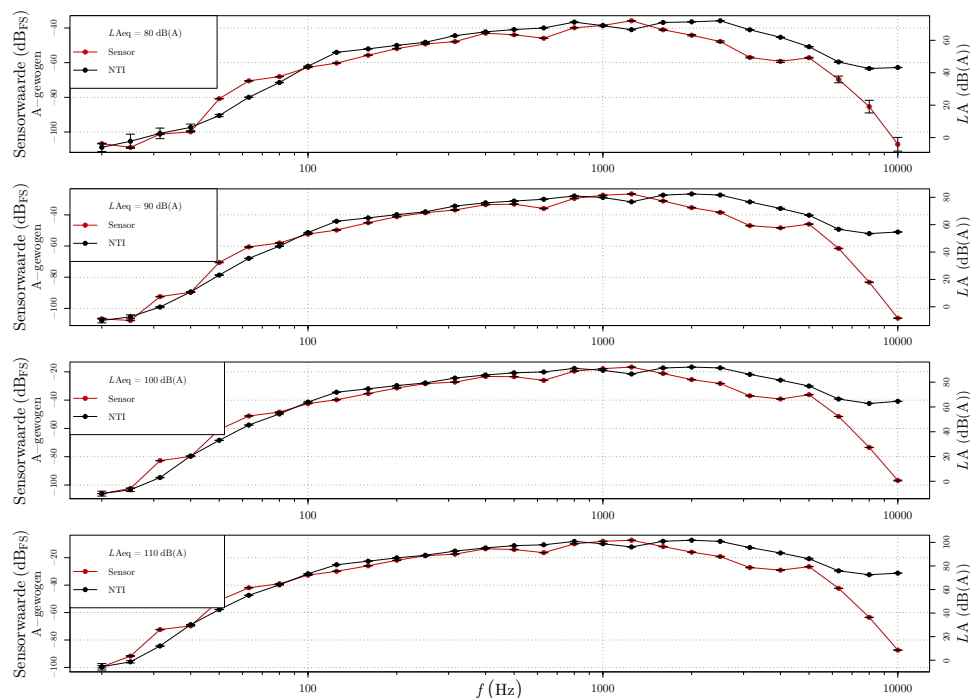
Figuur A1: Foto positie van de geluidssensor op de auto.

E. NTI gevoeligheidscurve



Figuur A2: Gevoeligheidscurve NTI in combinatie met M2230 microfoon (zwarte curve). [24]

F. Grafische weergave ijking geluidssensor

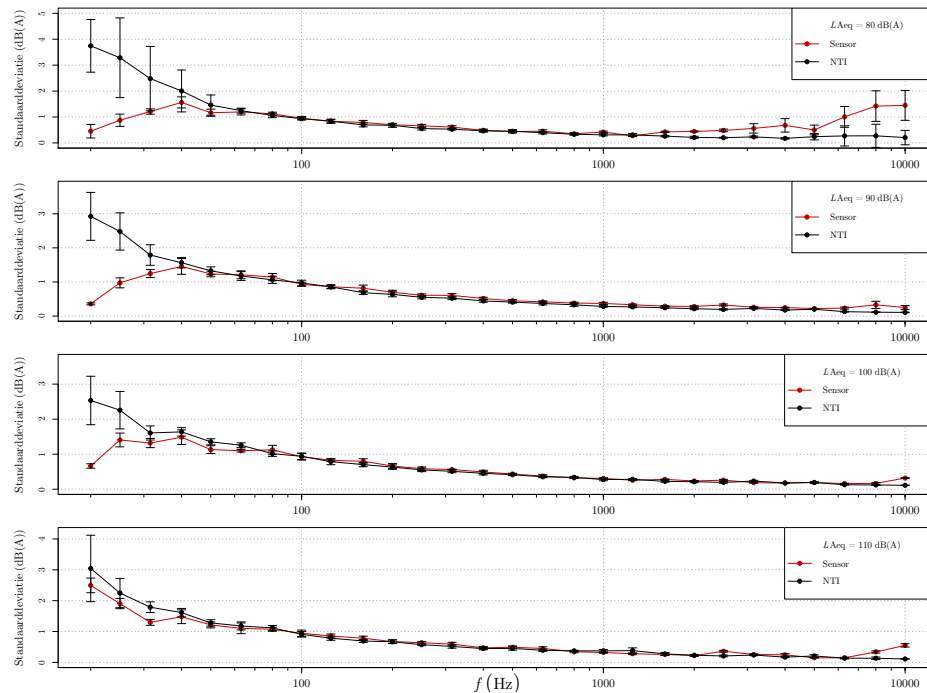


Figuur A3: Logaritmisch gemiddelde witte ruismeting $\pm$ standaarddeviatie van geluidssensor (linker y -as) en NTI (rechter y -as) als functie van frequentie, waarbij de meetpunten tertsbands waarden bedragen voor een gemiddelde van tien afzonderlijke metingen, met een meetduur van (60 ± 5) sec voor elke meting en bij een sample frequentie van 10 Hz en 1 Hz voor respectievelijk sensor en NTI. De equivalente geluidsniveaus zijn achtereenvolgens 80, 90, 100 en 110 dB(A).

Figuur A3 laat voor de geluidssensor de frequentie als functie van de logaritmisch gemiddelde ruwe dBFS waarden zien bij een sample frequentie van 10 Hz. Deze waarden zijn nog zonder enige correctie, maar wel inclusief hanning window en A filter. De NTI heeft bij deze metingen een sample frequentie van 48 kHz en een middelingsfrequentie van 1 Hz. Het verschil in middelingsfrequentie bij beide is voor dit figuur niet relevant, aangezien het in dit geval om gemiddelde waarden gaat.

Uit de vorm van beide curves blijkt dat de geluidssensor met name in het midden segment tertsbands ($315 \text{ Hz} \leq f \leq 2000 \text{ Hz}$) qua relatieve waarden overeenkomstig is aan de NTI. In het hogere segment frequenties ($f > 2000 \text{ Hz}$) kan de sensor het gemeten geluidsniveau van de NTI niet meer volgen. De correlatie tussen de sensor en NTI in het laagfrequente gebied ($f < 315 \text{ Hz}$) betekent niet direct dat de sensor gevoelig is in dit gebied. Vermoedelijk is de gebruikte speaker niet in staat om laagfrequent geluid te produceren. Dit wordt bevestigd door het feit dat de NTI in dit gebied amper onderscheid detecteert tussen verschillende geluidsniveaus. Uit de lage standaarddeviaties van de gemiddelden bij de sensor en NTI blijkt dat de spreiding in gemeten metingen voor

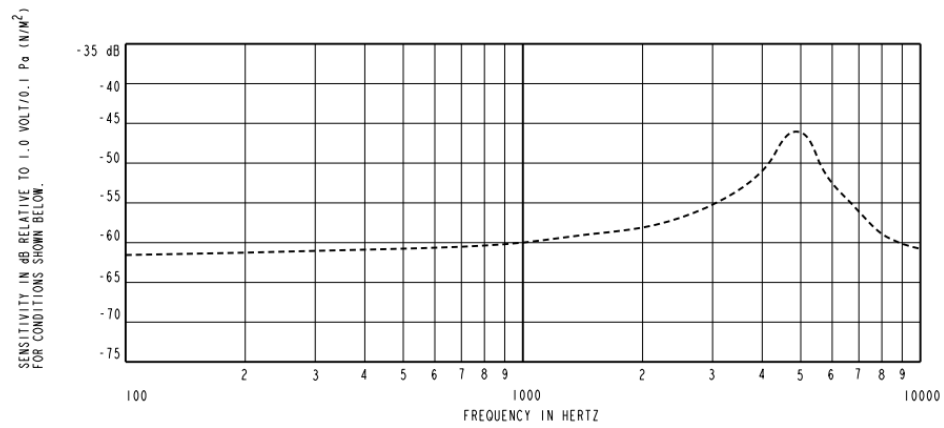
beide marginaal is. Dit hoeft echter nog niet te betekenen dat de spreiding per tertsbands per individuele meting ook laag is. Het kan immers zo zijn dat de spreiding van het gemiddelde van tien metingen laag is, maar dat de spreiding per individuele meting hoog is. Om de spreiding in individuele metingen te onderzoeken is de standaarddeviatie per meting per tertsbands bepaald. Het gemiddelde van de standaarddeviaties met daaropnieuw standaarddeviatie van is in figuur A4 opgenomen.



Figuur A4: Standaarddeviatie $\pm$ standaarddeviatie van witte ruismetingen, voor zowel geluidssensor als NTI. De meetpunten bedragen een gemiddelde spreiding van de gemeten geluidsniveaus bij tien afzonderlijke metingen, een meetduur van (60 ± 5) sec en een integratietijd van 1,0 seconde. Voor de equivalente geluidsniveaus geldt respectievelijk 80, 90, 100 en 110 dB(A).

Voor de standaarddeviaties van de geluidssensor geldt dat eerst voor elke tien metingen het logaritmisch gemiddelde is bepaald en vervolgens de standaarddeviatie daarin, zodat de sample frequentie van dezelfde waarde is als van de NTI. Uit figuur A4 blijkt eveneens dat de sensor in het midden en hoge frequentiegebied voor de geluidsniveaus 90, 100 en 110 dB(A) een nagenoeg gelijkwaardige spreiding in resultaten per individuele meting vertoont met de NTI. De hoge standaarddeviatie bij de NTI in het zeer laagfrequent gebied ($f < 63$ Hz) versterkt de hypothese dat de speaker laagfrequent niet toereikend is. De verlaagde standaarddeviatie van de sensor in dit gebied duidt erop dat de sensor amper iets heeft kunnen waarnemen van de dan al niet beschikbare frequenties.

G. Wegdekmeten sensor



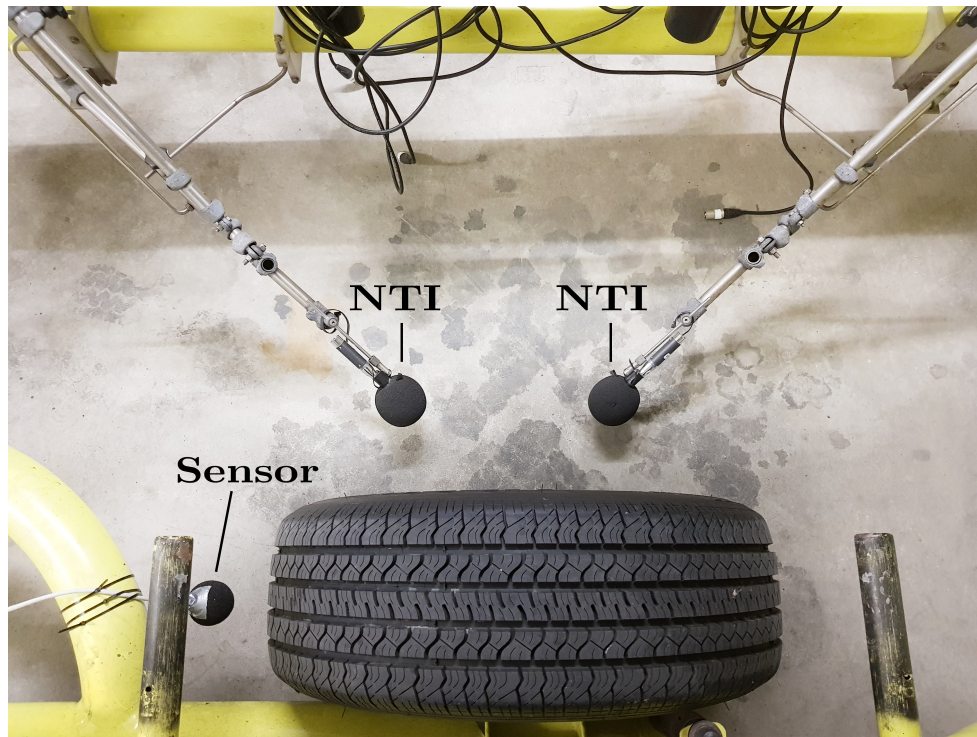
Figuur A5: Gevoeligheidscurve van de door wegdekmeten gebruikte geluidssensor.

H. Wegdekmeten en MEMS sensor overeenkomstige posities

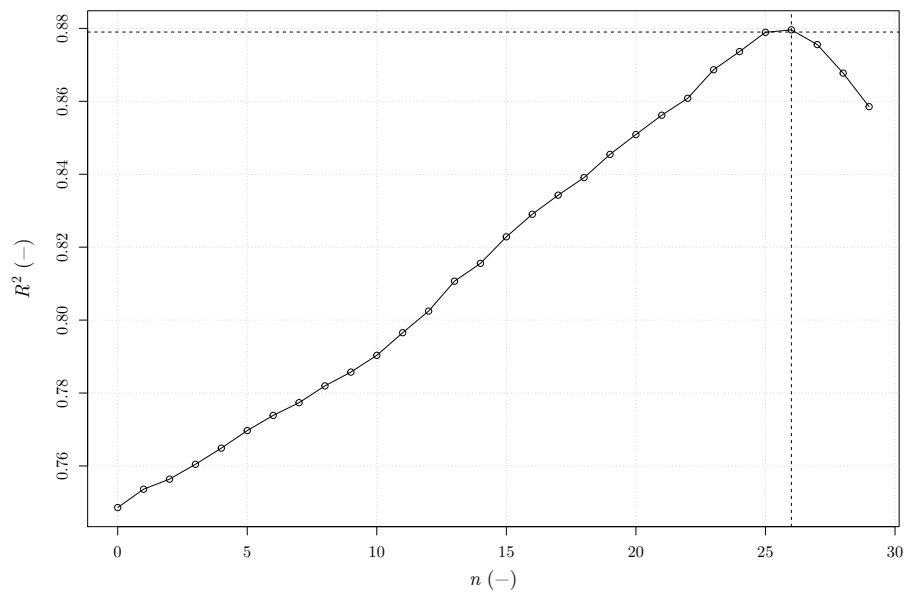


Figuur A6: Overeenkomstige posities van MEMS sensor en wegdekmeten dataset.

I. CPX simultaan



Figuur A7: Foto van de CPX meet aanhanger.



Figuur A8: Correlatiecoëfficiënt R^2 als functie het aantal verschuivingen.

J. Onnauwkeurighedsanalyse

J.1. Onnauwkeurigheid in CPX metingen

De totale onnauwkeurigheid δ_{totaal} van een CPX meting bestaat uit de volgende individuele onnauwkeurigheden [21, sec. 12]:

- δ_1 : onnauwkeurigheid in de meetprocedure (snelheid variaties, stabiliteit van systeem)
- δ_2 : onnauwkeurigheid van meetsysteem
- δ_3 : onnauwkeurigheid in wisselende meteorologische condities (na temperatuurcorrectie)
- δ_4 : Onnauwkeurigheid ten gevolge van externe bronnen
- δ_5 : Onnauwkeurigheid ten gevolge van reflecties door het voertuig, geometrie en positie systeem.

De totale onnauwkeurigheid wordt bepaalt door:

$$\delta_{\text{totaal}} = \sqrt{\sum_{i=1}^5 (c_i \delta_i)^2} \quad (36)$$

In tabel 7 zijn de onnauwkeurigheden met bijbehorende kansverdelingen, weging en bijdrage op basis van ISO schattingen gegeven.

Tabel 7: Onnauwkeurigheden in CPX metingen door variatie in meetsysteem, omstandigheden en meteorologische condities

Onnauwkeurigheid	Kansverdeling	Weging, c_i	Bijdrage
δ_1	Normaal	1	0,2 dB
δ_2	Normaal	1	0,3 dB
δ_3	Normaal	1	0,3 dB
δ_4	Asymmetrisch	1	0,1 dB (gesloten omgeving) 0,2 dB (open omgeving)
δ_5	Asymmetrisch/Normaal	1	0,2 dB (gesloten omgeving) 0,1 dB (open omgeving)
δ_{totaal}			0,5 dB (gesloten omgeving) 0,5 dB (open omgeving)

Uit figuur A4 blijkt dat de spreiding in meetresultaten van de sensor in het lineaire gebied gelijk is aan die van de NTI. Hieruit wordt geconcludeerd dat de δ_2 -waarde van 0,3 dB eveneens geldig is voor de sensor.

De beschreven onnauwkeurigheden zitten al verwerkt in de standaarddeviaties van de

figuren voor de CPX metingen. Het gegeven dat de gemeten standaarddeviaties hoger uitvallen dan de theoretische onnauwkeurigheden, komt doordat de variatie in wegdekken en kwaliteit van wegdek niet in de theoretische onnauwkeurigheden zijn opgenomen.

J.2. Onnauwkeurigheid in snelheid

De snelheid van de auto wordt na omzetting van GPS naar bolcoördinaten berekend door:

$$v = \frac{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}}{\Delta t} \quad (37)$$

Hiervoor geldt een onnauwkeurigheid van maximaal 2,5 meter [25] voor de daadwerkelijke GPS posities. Bij de geïnterpoleerde posities wordt eveneens een onnauwkeurigheid van 2,5 meter aangenomen. Dit komt bij een gelijkmatige verplaatsing neer op $\cos(45) \cdot 2,5$ en $\sin(45) \cdot 2,5 = 1,78$ meter in x en y .

De onnauwkeurigheid van Δt wordt bepaald door de standaarddeviatie in Δt , deze is 0,0006 seconde ($2\sigma = 0,0012$ seconde). De onnauwkeurigheid bij $x_i - x_{i-1}$ en $y_i - y_{i-1}$ wordt gegeven door:

$$\begin{aligned} \delta(\Delta x) &= \sqrt{(\delta x_i)^2 + (\delta x_{i-1})^2} \\ \delta(\Delta y) &= \sqrt{(\delta y_i)^2 + (\delta y_{i-1})^2} \end{aligned}$$

Vereenvoudiging van formule 37 leidt tot:

$$v = \frac{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}}{\Delta t}$$

De totale onnauwkeurigheid in v wordt gegeven door de partiële afgeleide naar Δx , Δy en Δt . Dit geeft in formulevorm:

$$\delta v = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial(\Delta x)} \delta(\Delta x)\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial(\Delta y)} \delta(\Delta y)\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial(\Delta t)} \delta(\Delta t)\right)^2} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \delta v &= \left(\left(\frac{(\Delta x)}{t \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}} \delta(\Delta x) \right)^2 + \left(\frac{(\Delta y)}{t \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}} \delta(\Delta y) \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. \left(\frac{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}}{t^2} \delta(\Delta t) \right)^2 \right)^{1/2} \end{aligned} \quad (39)$$

Als met een snelheid van $100 \text{ km/h} = 27,7778 \text{ m/s}$ wordt gereden en er een gelijke verplaatsing in x en y is, dan wordt de afgelegde afstand Δx en Δy gegeven door respectievelijk $\cos(45) \cdot 27,7778$ en $\sin(45) \cdot 27,7778 = 19,64186$ meter. Invulling in formule 39 levert dan een theoretische onnauwkeurigheid van $2,5 \text{ m/s} = \mathbf{9 \text{ km/u}}$.

Deze waarde is niet in overeenstemming met de werkelijke spreiding in de gemeten snelheden, deze is veel kleiner.

Voor de werkelijke onnauwkeurigheid in de positie van de GPS worden de GPS posities geselecteerd bij een snelheid van $79,95 \text{ km/u} \leq v \leq 80,05 \text{ km/u}$. Dit zijn de voor de CPX aanhanger gemeten snelheden, die berekent zijn op basis van rotatiesnelheid band en GPS snelheid van de aanhanger. Voor deze snelheden geldt voor de berekende posities uit de sensor GPS een gemiddelde afgelegde afstand van 2,76 meter per 0,1 seconde. De standaarddeviatie hierin is 0,06 meter. Voor een betrouwbaarheidsinterval van 95% geldt dan $2\sigma = 0,12$ meter. Formule 37 wordt nu als volgt gegeven:

$$v = \frac{r}{\Delta t}$$

Hierin is r de afgelegde weg met $\delta r = 0,12$ meter. De onnauwkeurigheid in de snelheid wordt nu bepaald door de differentiaal:

$$\delta v = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial r} \delta r\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial (\Delta t)} \delta(\Delta t)\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{(\Delta t)} \delta r\right)^2 + \left(\left(-\frac{r}{(\Delta t)^2}\right) \delta(\Delta t)\right)^2} \quad (40)$$

Invulling geeft een δv van $1,24 \text{ m/s} = \mathbf{4,5 \text{ km/u}}$.

J.3. Onnauwkeurigheid in lineaire modellen

NB. In deze sectie wordt de onnauwkeurigheid van de coëfficiënten in de lineaire modellen berekend op basis van partiële differentiatie en invulling van meest gangbare waarden. Een betere benadering is het toevoegen van de meetonnauwkeurigheden in de lineaire modellen. Dit bleek echter binnen R niet eenvoudig binnen de mogelijkheden te liggen.

De lineaire relaties in figuur 11 en 19 zijn van de vorm:

$$L = a + b \log(v/80)$$

Deze relatie kan uitgedrukt worden in de coëfficiënten a en b als volgt:

$$a = L - b \log(v/80)$$

$$b = \frac{L - a}{\log(v/80)}$$

De volgende totale differentiaal gelden:

$$\delta a = \sqrt{\left(\frac{\partial a}{\partial L} \delta L\right)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial v} \delta v\right)^2} \quad (41)$$

$$\delta b = \sqrt{\left(\frac{\partial b}{\partial L} \delta L\right)^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial v} \delta v\right)^2} \quad (42)$$

Dit geeft na differentiatie:

$$\delta a = \sqrt{((1)\delta L)^2 + \left(-\frac{b}{v \log(10)} \delta v\right)^2} \quad (43)$$

$$\delta b = \sqrt{\left(\frac{\log(10)}{\log\left(\frac{v}{80}\right)}\delta L\right)^2 + \left(-\frac{\log(10)(L-a)}{v \log^2\left(\frac{v}{80}\right)}\delta v\right)^2} \quad (44)$$

Uit het gemiddelde lineaire model uit figuur 11 volgt dat bij een snelheid van 100 km/u een geluidsniveau ontstaat van 84,9 dB. Daarnaast geldt dat $\delta L = 0,5$; $a = 82,5$; $b = 24,4$, $v = 100$ km/u, $\delta v = 4,5$ km/u en $v = 100$ km/u. Dit geeft $\delta a = 0,77$ dB en $\delta b = 7,11$ dB/decade. Afgerond $\delta a = \mathbf{1 \text{ dB}}$ en $\delta b = \mathbf{7 \text{ dB/decade}}$.

De coëfficiënten in de temperatuurrelatie worden als volgt geschreven:

$$L = \alpha + \beta(T - 20); \quad a = L - \beta(T - 20); \quad b = \frac{L - \alpha}{(T - 20)}$$

Dit levert de totale differentiaal:

$$\delta \alpha = \sqrt{\left(\frac{\partial \alpha}{\partial L}\delta L\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial T}\delta T\right)^2} \quad (45)$$

$$\delta \beta = \sqrt{\left(\frac{\partial \beta}{\partial L}\delta L\right)^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial T}\delta T\right)^2} \quad (46)$$

Dit geeft na differentiatie:

$$\delta \alpha = \sqrt{((1)\delta L)^2 + ((-\beta)\delta T)^2} \quad (47)$$

$$\delta \beta = \sqrt{\left(\frac{1}{(T - 20)}\delta L\right)^2 + \left(-\frac{L - \alpha}{(T - 20)^2}\delta T\right)^2} \quad (48)$$

Voor L , α en β worden de gemiddelde waarden uit de twee gegeven regressievergelijkingen bij een temperatuur van 10°C ingevoerd. Dit levert voor $\delta \alpha$ een waarde van **0,6 dB** en voor $\delta \beta$ een waarde van **0,06 dB/(T - T_{ref})**.

De lineaire relatie tussen de sensor en CPX uit figuur 22 is van de vorm:

$$y = a + bx; \quad a = y - bx; \quad b = \frac{y - a}{x}$$

Dit geeft de differentiaal naar a en b als volgt:

$$\delta a = \sqrt{\left(\frac{\partial a}{\partial y}\delta y\right)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial x}\delta x\right)^2} \quad (49)$$

$$\delta b = \sqrt{\left(\frac{\partial b}{\partial y}\delta y\right)^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial x}\delta x\right)^2} \quad (50)$$

Na differentiatie geldt

$$\delta a = \sqrt{((1)\delta y)^2 + ((-b)\delta x)^2} \quad (51)$$

$$\delta a = \sqrt{\left(\left(\frac{1}{x}\right)\delta y\right)^2 + \left(\left(-\frac{y-a}{x^2}\right)\delta x\right)^2} \quad (52)$$

Invulling van $x(\text{NTI}) = 100 \text{ dB(A)}$ geeft $y(\text{sensor}) = 86,12 \text{ dB}$ en δx en $\delta y = 0,5 \text{ dB}$ levert een onnauwkeurigheid in a van **0,7 dB** en in b van **0,009**.