Geluidsonderzoek piekgeluiden voertuigen Rotterdam

munisense

Rapportnummer: MSR-201109-1

Datum: 23-11-2020

Versie: 1-4-5 Definitief

Auteurs: George Boersma Munisense BV

Peter Wessels TNO [onderzoek naar audio clustering in bijlage 1]

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave 3
Inleiding 5
Samenvatting en conclusie 6
Aanbevelingen 8
Resultaten 9
Algemeen 9
Huidige regelgeving en normen 10
Verdeling naar geluidbron 11
Auto's 13
Motoren 17
Bromfietsen 17
Claxons 17
Tram 18
Andere geluiden 18
Verdeling van geluidsbronnen over de tijd 19
Verdeling naar straat, dagperiode en week 22
Invloed van afsluitingen, weekend en bouwvak (1 tot 22 augustus). 24
Invloed op geluidsklimaat 26
L_{den} en L_{night} 26
Harmonica Index 29
Bijlage 1: verkenning Audio Clustering door TNO 31
Inleiding 31
Machine learning 31
Toegepaste methode 33
Resultaten 34
Conclusies en aanbevelingen 37
Bijlage 2: Doorontwikkeling naar handhavingsinstrument 38
Inzicht in geluidsklimaat en piekgeluiden in stedelijk gebied. 38
Inzicht in de bron van het piekgeluid 38
Gebruik als handhavingsinstrument 38
Geluid kunnen lokaliseren 39
Voertuig identificatie 39

Bijlage 3: Meetgebieden en meetposities 40
Nauwkeurigheid van de metingen 41
Gebruikte monitoringsysteem 41
Terugrekenen naar 7,5 meter 41
Meerdere bronnen tegelijk 41
Terugrekenen naar bronsterkte 41
Verband tussen de gemeten LAeq,1s en LAFmax waarden 42
Details meetposities 43
Meent 43
West-Kruiskade 44
Nieuwe Binnenweg 45
Bijlage 4: Gebruikte monitoringstations 46

Inleiding

In Rotterdam zijn er veel klachten over piekgeluiden die worden veroorzaakt door voertuigen. Daarbij gaat het onder andere om auto's of motoren met al dan niet een aangepaste uitlaatsysteem, (onnodig) claxonneren, bromfietsen, autoalarmen, etc. Rotterdam wenst deze overlast aan te pakken. Om hiervoor de juiste middelen te kunnen inzetten is ervoor gekozen om eerst een duidelijker beeld te krijgen van de overlast.

Om inzicht te krijgen in de geluidsbronnen, de frequentie, tijdstippen en locatie is er in de periode van 7 augustus tot 4 oktober van 2020 een meetprogramma uitgevoerd in de straten de Meent, de West-Kruiskade en de Nieuwe Binnenweg.

In elke straat zijn op drie posities geluid monitoring stations geplaatst, die het geluidsniveau en de frequenties(tonen) van het geluid continu hebben geregistreerd op 7,5 meter van de geluidsbron[1]. Daarnaast is het audiosignaal van 15:00 tot 02:00 opgenomen. Op de Meent en aan de West-Kruiskade is er ook een videocamera gekoppeld die in diezelfde periode een "geblurred" beeld van de straat heeft opgenomen.

6283 geluidpieken die boven de 80 dB(A) uit kwamen zijn uitgeluisterd om hiermee het brongeluid te kunnen herkennen. Bij herkenning is dit piekgeluid geclassificeerd. Op basis van de camerabeelden is deze classificatie gevalideerd en indien nodig gecorrigeerd. Dit heeft geleid tot een audiobestand van deze piekgeluiden en een representatief beeld van de piekgeluiden op 6 van de 9 meetlocaties. De andere locaties zijn gebruikt voor validatie.

Een deel van de audio is door TNO automatisch geclusterd, hierdoor is er ook een beeld ontstaan van de piekgeluiden onder de 80 dB(A) grens, wat het beeld completer maakt. Maar ook tot doel om te onderzoeken of automatische detectie mogelijk is.

De 80 dB(A) grens is gekozen omdat aangenomen mag worden dat de meeste voertuiggeluiden hier onder zitten en geluiden boven dit niveau dus uitzonderlijk zijn, maar ook omdat dit niveau ruim boven de grenswaarde van piekgeluiden ligt die normaal gehanteerd worden bij industrie of geluid van laden/lossen. Pieken boven de 80 dB(A) kunnen daarom worden gezien als zeer hinderlijk.

Een tweede doel is om te onderzoeken of en met welke betrouwbaarheid een systeem kan worden ontwikkeld, waarbij de geluidsherkenning automatisch verloopt en in real-time. Dit in combinatie met identificatie van het voertuig, zou als potentieel handhavingsinstrument kunnen worden ingezet.

Het onderzoek is in opdracht van de gemeente Rotterdam en in samenwerking met DCMR en TNO uitgevoerd. De bijdrage van TNO (bijlage 1) is beperkt tot een evaluatie van een algoritme dat gericht is op het sneller automatisch verkrijgen van inzicht in de geluidsituatie.

[1] De 7,5 meter afstand wordt ook gehanteerd om het passagegeluid van een voertuig te bepalen bij de dynamische meetmethode.

Samenvatting en conclusie

In de onderzoeksperiode zijn naar schatting ruim 16000 piekgeluiden geconstateerd boven de grens van 80 dB(A) gemeten op 7,5 meter van de geluidbron. Bij 6283 hiervan is op basis van uitluisteren en camerabeelden de geluidbron vastgesteld. Dit onderzoek had betrekking op 3 straten in Rotterdam in de periode van 8 augustus tot 4 oktober 2020. In deze periode waren Corona maatregelen van kracht. In welke mate dit de resultaten van het onderzoek heeft beïnvloed is niet bekend.

Het onderzoek is in Nederland en voor zover bekend internationaal in zijn omvang uniek. Niet eerder is op deze schaal objectief het aantal geluidpieken opgenomen en gelabeld naar een bron. Eerdere onderzoeken waren veelal op enquêtes gebaseerd.

Voertuigen

- De geluidpieken worden in 37% van de gevallen veroorzaakt door auto's, 31% door motoren, 12% door claxons, 10% door bromfietsen of scooters, 4% door trams en 2% door sirenes. De rest bestond uit een breed scala van geluiden. Passages in absolute aantallen: 2324 auto, 1947 motoren, 753 claxon, 628 brommers.
- 97% Van de autopassages ligt rond de 65 tot 70 dB wat je op basis van de wettelijke voertuigemissies mag verwachten.
- Voor auto's kunnen hogere geluidemissies voorkomen, door ander rijgedrag, toerentallen, belasting en ander uitlaatsysteem dan bij de testcondities. Dit kan tot een verhoging van 16 dB zorgen. Geluidniveaus boven 80 dB kunnen dus voorkomen, echter boven de 90 dB is hoogst onwaarschijnlijk. Juridisch is het een grijs gebied.
- Ongeveer 25% van de autopassages boven de 80 dB is met een niet reguliere uitlaat (sport of een (afsluitbaar) gat in de uitlaat). Dit is geschat op basis van het uitluisteren, niet bewezen.
- Motoren hadden een 31% aandeel in het aantal piekgeluiden. Dit is mede te verklaren doordat motoren hogere geluidemissie-normen hebben. Ze mogen wettelijk dus meer geluid maken. Naar schatting 80% van de motorpassages zit boven de 80 dB. Ook hier zijn, zij het in mindere mate, hoge geluidniveaus met al dan niet aanpassingen in het uitlaatsysteem, geconstateerd. Knallen in de uitlaat kwam voor maar minder dan bij auto's. De diversiteit van motoren is groot, naast de reguliere motoren zijn quads en trikes gesignaleerd.
- Bromfietsen[2], waren de vierde categorie. Dit is opvallend, omdat bromfietsen gemiddeld landelijk op de eerste plaats qua geluidoverlast staan (op basis van enquêteresultaten). In dit onderzoek zaten de geluidpieken van auto's en motoren ruim boven het aantal geluidpieken van bromfietsen.
- Opvallend in de meting is dat piekniveaus van meer dan 80 dB(A) door trucks of vrachtwagens nauwelijks zijn geconstateerd. Wel zijn er op enkele plaatsen piekniveaus geconstateerd van de achteruitrij-signalering van vrachtauto's.

[2] In het rapport wordt geen onderscheid gemaakt tussen bromfietsen en scooters. In de rest van het rapport wordt dan ook alleen over bromfietsen gesproken.

Waar en wanneer

- In de onderzoeksperiode was de West-Kruiskade het zwaarst belast. Bijna 2x meer pieken dan op de Meent en de Nieuwe Binnenweg. Op zwaarbelaste momenten zo'n 10 pieken per uur in de avond en tot 2 tot 3 keer per uur in de nacht.
- Bij goede weersomstandigheden en op vrijdag en zaterdag zijn de meeste geluidpieken.
- De geluidspieken nemen in middag geleidelijk toe tot een piek in de avond en nemen dan geleidelijk af. Deze piek in de avond is verschillend per straat. Bij de West Kruikade ligt deze tussen 19:00 en 20:00. Bij de Nieuwe Binnenweg is dit één uur later en op de Meent nog één uur later.

Gezondheid

- Uit onderzoek van TNO blijkt[3] dat piekgeluiden boven de 70 tot 75 dB(A) als hinderlijk worden beschouwd en voor slaapverstoring zorgen. De geregistreerde geluidpieken lagen minimaal 10 en tot soms 30 dB in avond en nacht hoger. Deze niveaus zijn dermate hoog dat slaapverstoring zeer aannemelijk is.

Geluidherkenning en handhaving

- De ingewonnen informatie is van voldoende niveau om indicatieve uitspraken te doen over voertuiggeluiden.
- Met de ingewonnen informatie is een goede basis gelegd voor een automatische geluidsherkenning. De grote winst in deze stap zijn de grote hoeveelheid samples voertuiggeluiden die zijn uitgeluisterd en gelabeld (een dergelijk sample bestand is nog nooit eerder gemaakt in Nederland).
- Er zijn vervolgstappen in de techniek nodig om geluid in de topniveaus beter te onderscheiden en tot een hogere betrouwbaarheid te komen. Door toevoeging van afstandsdetectie is een lawaaiflitser technisch ontwikkelbaar.

Overige waarnemingen

- Op basis van videobeelden lijkt het waarschijnlijk dat veel van de pieken door een beperkt aantal auto's wordt veroorzaakt, wij vermoeden een 100-tal voertuigen. Een aantal auto's wordt meerdere malen per dag (tot soms 16x) waargenomen. Ook werd (visueel) geconstateerd dat er rondjes voorkwamen. Hetzelfde voertuig dat op verschillende straten een geluidspiek geeft.
- Er waren naar schatting 70 waarnemingen van claxon concerten, waar meerdere auto's aan deelnamen. Soms meerdere keren op één dag en voor soms voor meerdere minuten. Dit vond voornamelijk op de West-Kruiskade plaats. Het betrof 8% van het aantal piekgeluiden van claxons.
- De verhoogde piekwaarden komen slechts beperkt terug in een verhoging van de gemeten L_{den} en L_{night} niveaus, deze waarden zijn dan ook geen goede indicatie voor de overlast door piekgeluiden.

[3] Beoordeling van geluidpieken in de woonomgeving, TNO-Rapport PG/VGZ/99.023

- In een aantallen gevallen is geconstateerd dat auto alarmen werden getriggerd door hoge piekgeluiden.
- Een beter inzicht in de hinder door piekgeluiden kon worden bereikt door presentatie van de meetwaarden met de Harmonica Index, die vooral is bedoeld om omwonenden inzicht te geven in het heersende geluidsklimaat

Aanbevelingen

- Structureel meten geeft inzicht
  Met het monitoringsysteem kan op eenvoudige wijze inzicht worden gegeven in de geluidbelasting en hinder in een gebied, deze informatie kan real-time beschikbaar worden gesteld aan betrokkenen, waaronder bewoners. Door continue over meetgegevens te beschikken houdt de gemeente de vinger aan de pols en kan dit het vormen van beleid of handhaving ondersteunen. In de huidige configuratie kan het systeem geluidpieken, detecteren en tellen.

  Het huidige meetsysteem kan ook mobiel worden ingezet op die plaatsen waar op dat moment de overlast het hoogst is.

- Real-time Inzicht in hinder van de verschillende geluidsbronnen
  Als de monitoringsystemen ook inzicht moeten geven in de geluidsbronnen maar dan direct en continue, dienen de monitoringsystemen zoals hier gebruikt, te worden doorontwikkeld, zodat geluidsbronnen in real-time kunnen worden herkend. Voor deze doorontwikkeling is met dit project een goede basis gelegd. Het wordt aanbevolen dit te vervolgen. Deze functionaliteit zou dan in het seizoen van 2021 inzetbaar kunnen zijn.

- Doorontwikkeling als handhavingsinstrument.
  Wil het goed inzetbaar zijn als handhavingsinstrument, dat kan het monitoringsysteem worden uitgebreid met lokalisatie functies, waarmee de geluidsbron, naast herkenning ook wordt aangewezen. Deze functionaliteit is al beschikbaar maar dient met de geluidsherkenning te worden gecombineerd.

  Hiernaast is het wenselijk om ook de hinder situaties op beeld vast te leggen. Op basis hiervan wordt handhaving al eenvoudiger zeker als de resolutie van de beelden voldoende is om nummerplaatherkenning (ANPR-camera) te faciliteren.

  Mede gelet op de omvang van het aantal piekgeluiden, wordt aanbevolen deze ontwikkeling te stimuleren. Technisch is het realiseerbaar.

- Bescherming van de privacy van burgers
  In het project is zeer veel aandacht gegaan naar de bescherming van de privacy van de bewoners in het meetgebied. Dit heeft geleid tot strikte afspraken over de verwerking van audiosignalen tussen de Gemeente Rotterdam, Munisense en TNO. Door geluidherkenning al in het monitoringsysteem te laten plaatsvinden, kan worden voorkomen dat audio gegevens onbedoeld ontsloten kunnen worden.

Resultaten

Algemeen

Onderstaande gegevens zijn gebaseerd op piekgeluiden (LAeq,1s[4] waarden boven de 80 dB(A)), gemeten op de meetposities. De meetwaarden zijn herleid tot de geluidniveaus op een bronafstand van 7,5 meter. Hiermee worden de metingen vergelijkbaar met de meetmethode waarbij het geluidsniveau wordt geregistreerd bij het voorbijrijden op 7,5 meter afstand. Voor het geluid op de gevel is dit gemiddeld 2 dB lager (verschilt per meetpunt).

Pieken boven de 80 dB(A) kunnen worden gekwalificeerd als zeer hinderlijk en zeker in de avond en nacht. De gangbare normen voor piekgeluiden (LAFmax[5]) op de gevel bedragen maximaal 70 dB(A) in de avond en nacht. De hier gemeten en geclassificeerde piekgeluiden liggen hier dus fors boven.

Naast de LAeq,1s worden piekniveaus ook vaak aangegeven met het LAFmax niveau, deze waarden zijn ook geregistreerd en zijn afhankelijk van het type geluid 2 tot 6 dB hoger. Alle genoemde meetwaarden in dit rapport gaan echter uit van LAeq,1s waarden.

De duur van de geluidpieken varieert met de bron en in geval van voertuigen met de snelheid. De geconstateerde duur van de pieken (periode boven de 80 dB(A)) zat tussen de 6 en 15 seconden voor passages en 1 tot 2 seconden voor claxon geluiden (met uitzondering van de 'toeter concerten', welke soms minuten duurde).

In totaal zijn op de 9 meetpunten naar schatting (op basis van extrapolatie) meer dan 16.000 geluidpieken geconstateerd in de meetperiode van 8 augustus tot en met 4 oktober (60 dagen). In de periode van 15:00 tot 02:00 uur konden de geluidpieken worden uitgeluisterd en op basis hiervan kon de geluidbron worden bepaald en worden voorzien van een classificatie. Dit is een geschat aantal van 11.000 geluidpieken. Door het grote aantal zijn uiteindelijk per straat maximaal twee van de drie meetpunten de geluidpieken uitgeluisterd. Dit levert een totaal van zo'n 6300 geclassificeerde geluidpieken op. Hiervan zijn ook de geluidsamples vastgelegd. Deze geluidsamples bevatten geen herkenbare stemgeluiden.

Bij twee meetpunten was ook een camera geplaatst. Van deze meetpunten zijn "geblurde" videofragmenten bekeken en is de classificatie gevalideerd en waar nodig gecorrigeerd. Uit de validatie bleek dat het lastig was om auto's en sommige motoren goed te onderscheiden. Dit was in 10% van de gevallen fout. Van 2500 geluiden is dit gecorrigeerd, daarna lukte het steeds beter om op gehoor het onderscheid te maken. De schatting is dat in het labelen van auto's of motoren tot 5% fouten kunnen zitten.

[4] LAeq,1s is het gemiddelde A-gewogen geluidniveau in 1 seconde.
[5] LAFmax is het A-gewogen maximale gemeten geluidniveau in een periode met een de tijd-weging FAST.

In tabel 1 is het resultaat teruggerekend naar een gemiddeld aantal geluidpieken per dag en per uur.

	aantal meetpunten	aantal geluidpieken over de meetperiode	aantal per meetpunt	aantal per dag	aantal per dag per meetpunt	aantal per uur per meetpunt
geluidspieken hele periode (extrapolatie)	9	16.156	1.795	269	30	1,2
In periode 15:00 tot 02:00 (extrapolatie)	9	11.309	1.257	188	21	1,9
Uitgeluisted en gelabeld over 5 meetpunten	5	6.283	1.257	105	21	1,9
Gevalideerd met camera 2 meetpunten	2	2.500	1.250	42	21	1,9

Tabel 1: Aantal geconstateerde piekgeluiden in relatie tot het aantal gelabelde en gevalideerde piekgeluiden.

Van het totaal van 510 meetdagen (meetpunten maal periode), zijn 20 dagen geselecteerd en zijn de geluidpieken door TNO geanalyseerd. TNO gebruikte hiervoor een automatische methodiek, waarbij geluiden met gelijke eigenschappen werden geclusterd. In deze methode zijn de pieken gedetecteerd van geluiden die 10 dB boven een voortschrijdend L50[6] niveau uitkwamen. In totaal heeft TNO 7700 pieken gevonden wat neerkomt op ruim het tienvoudige aantal gevonden geluidpieken per meetpunt per dag t.o.v. de afgeluisterde pieken. Een deel van dit verschil is toe te schrijven aan de lagere detectiedrempel. Een ander deel omdat de methode van TNO gelijktijdig pieken op verschillende frequenties kan detecteren.

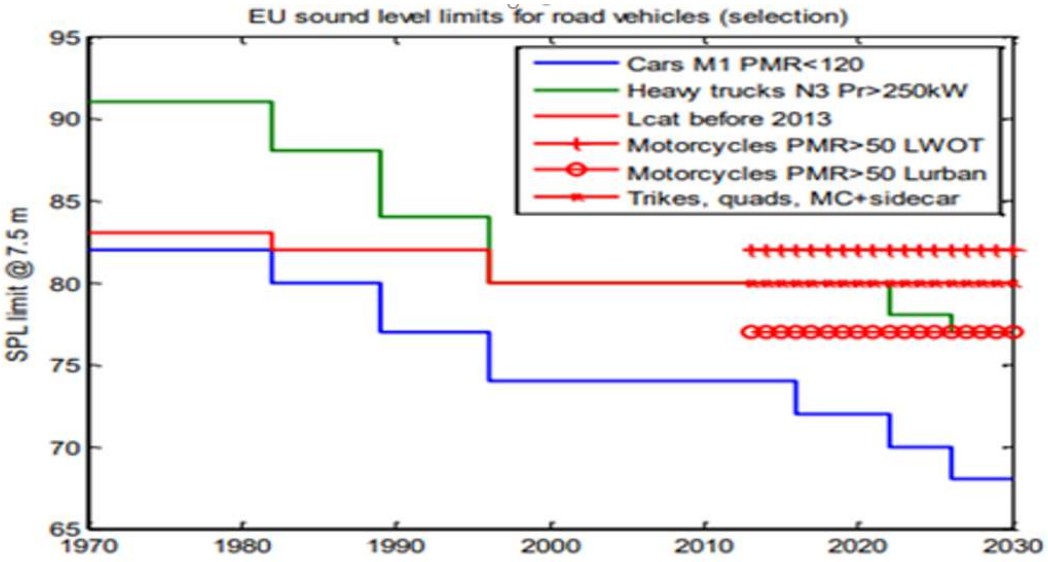
Alle meetgegevens, inclusief de per piekgeluid geannoteerde geluiden, zijn tot op detail niveau beschikbaar in de munisense portal. Deze gegevens blijven tot 6 maanden na het project einde beschikbaar. De audio opnamen en video opnamen worden 3 maanden na het project om privacy redenen verwijderd, met uitzondering van de geanonimiseerde geluidsamples van de piekgeluiden, welke voor het trainen en testen van de automatische geluidherkenning wordt ingezet.

Huidige regelgeving en normen

Voor de normen van geluidwaarden wordt graag verwezen naar de notie van TNO over de Europese limieten[7]. Een overzicht in de ontwikkeling van de normen is overgenomen en in figuur 1 weergegeven. Hierin is het duidelijk dat door de jaren heen de geluidemissiegrenzen van auto's steeds strenger zijn geworden en in de nabije toekomst nog strenger worden. Dit ligt anders voor motoren. Hier zijn de normen niet strenger geworden, deze zullen dus in de regel veel hogere geluidemissie hebben dan auto's.

De in figuur 1 getoonde waarden zijn typekeuringsgrenswaardes voor LAFmax op 7,5 meter bij bescheiden optrekken rond de 30 tot 50 km/h. Voertuigen kunnen in de praktijk veel meer geluid produceren bij hogere toerentallen, sportstanden en manipulatie.

[6] L50 is het geluidniveau waarbij 50% van de geluidniveau waarden in een periode boven zitten.
[7] Europese limieten voor geluid- en uitlaatemissies van tweewielers. TNO, DHW-2019-100321640



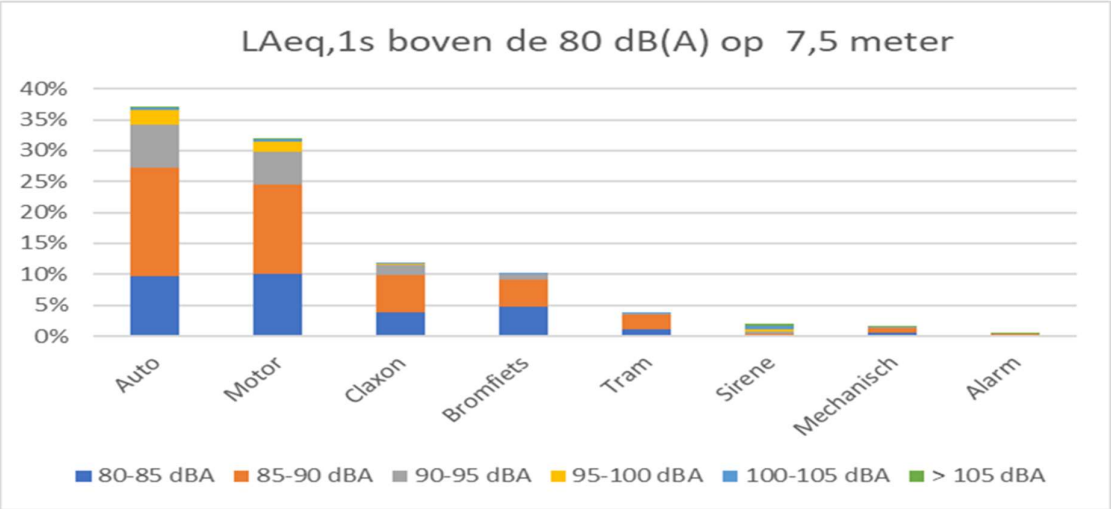
Figuur 1: Historische ontwikkeling van limieten voor geluidemissies van geselecteerde klassen auto's, trucks en motorfietsen sinds 1970. (overgenomen uit rapport van TNO DHW-2019-100320199)

Verdeling naar geluidbron

Van alle 6283 uitgeluisterde geluidpieken werd 37% veroorzaakt door auto's, 31% door motoren, 12% door claxons, 10% door bromfietsen, 4% door de tram en 2% door sirenes (politie, brandweer en ambulance). Het restant van 4% bestond uit een tiental andere bronnen die statistisch nauwelijks gewicht hebben. Deze zijn verder apart benoemd.

Als alleen naar de met de camera gevalideerde geluidpieken (n=2500) wordt gekeken, bedragen de percentages 39%, 31%, 14%,10% voor respectievelijk auto's, motoren, claxons en bromfietsen.

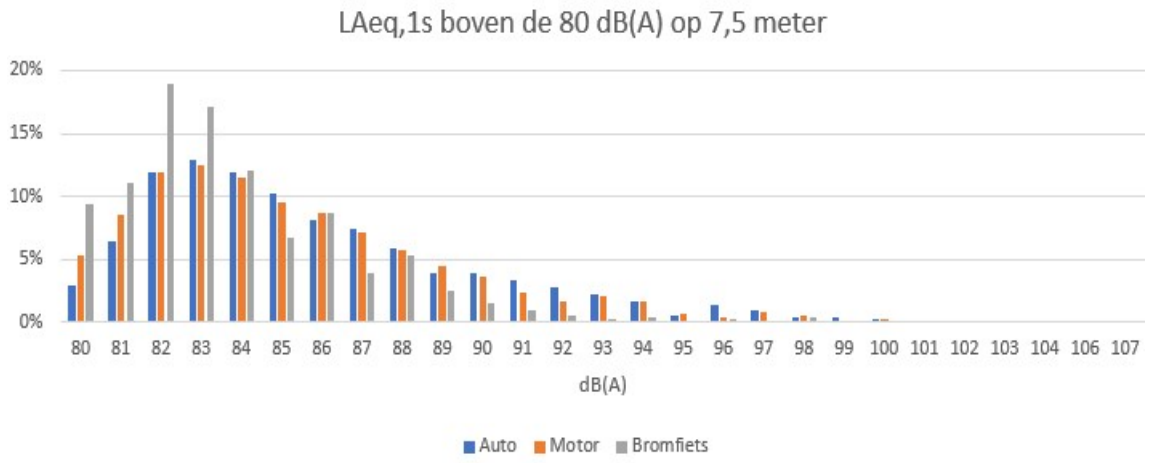
In figuur 2 is de statistische verdeling over de bronnen weergegeven. In deze grafiek is met kleuren het geluidsniveau in stappen van 5 dB weergegeven.



Figuur 2: Verdeling van de gemeten LAeq,1s niveaus teruggerekend naar 7,5 meter.

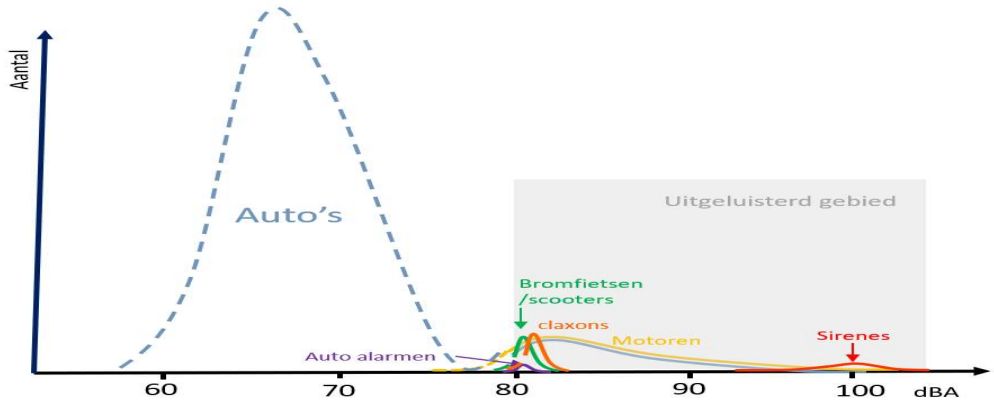
Indicatief kan worden gesteld dat het werkelijke brongeluid, dat zich op 7,5 meter van het monitoringstation bevindt, ongeveer 15 dB hoger is dan de hier aangegeven meetwaarde.

In figuur 3 zijn de gemeten geluidniveaus per dB voor auto's, motoren en bromfietsen weergegeven. De piekgeluiden van auto's en motoren ontlopen elkaar niet veel. De piekgeluiden van bromfietsen lagen veelal net boven de 80 dB(A). Ook is te zien dat de piek van de verdeling bij auto's, motoren en bromfietsen net iets anders ligt (zie figuur 3).



Figuur 3: Verdeling gemeten geluidniveaus boven de 80 dB(A) voor auto's motoren en bromfietsen.

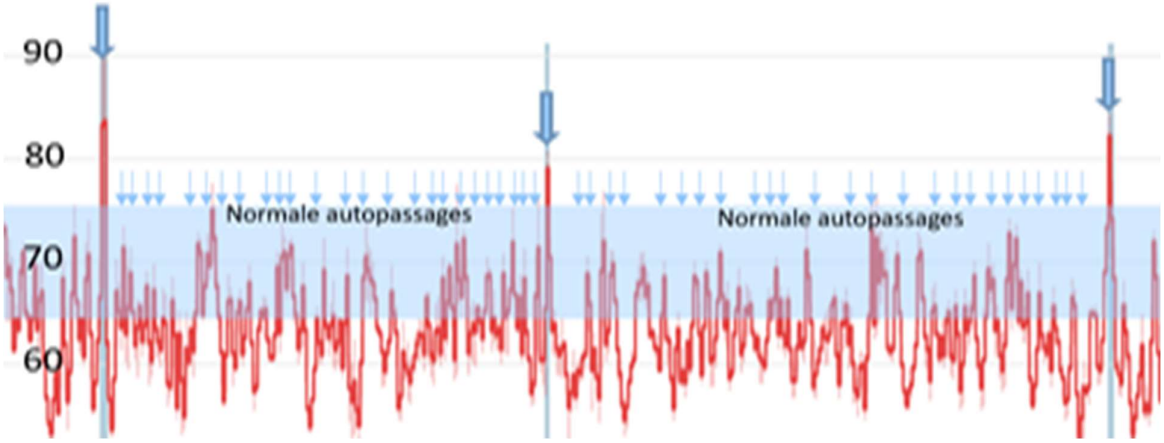
Het is belangrijk om te constateren dat door alleen te kijken naar de geluidpieken van 80 dB(A) en hoger, een groot aantal geluidpieken van de passages onder de 80 dB(A) niet zichtbaar zijn. Als dat wel het geval zou zijn zou onderstaand beeld (figuur 3) ontstaan. De meeste passages van auto's zijn niet zichtbaar. Voor motoren ligt dit anders, daar verwachten we dat de meeste motoren net boven de 80 dB(A) zitten. Dit geldt ook voor de bromfietsen en scooters echter met een kleinere spreiding. Piekniveaus van sirenes zitten rond de 100 dB(A). Opvallend is wel dat de claxons iets vaker dan bromfietsen zijn geteld.



Figuur 4: Geschatte en gemeten verdeling van geluidniveaus van 60 tot 100 dB(A) tijdens de meetperiode.

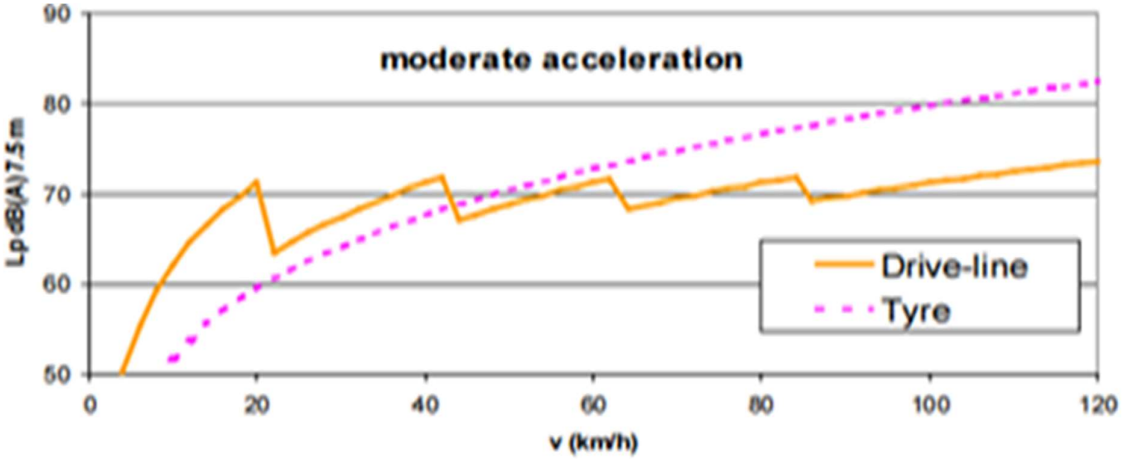
Auto's

De meeste passerende auto's zorgen voor een maximaal geluidsniveau van 65 tot 75 dB(A). Omdat deze pieken lager zijn dan de grenswaarde van 80 dB(A) zijn ze niet in het overzicht opgenomen. De schatting is dat het hier om meer dan 97% van de passages gaat. Dit is gebaseerd op een steekproef van een aantal meetperiodes, waar de losse autopassages zijn geteld. Figuur 5 illustreert dit. Hier zijn tussen de piekniveaus de normale auto-passages aangegeven. Deze figuur laat ook zien dat piekniveaus tot 25 dB boven de gebruikelijke passages niveau van 70 dBA kunnen liggen.



Figuur 5: snapshot van gemeten geluidniveaus van reguliere auto passages en ook drie piekniveaus van passages die hier ver bovenuit steken.

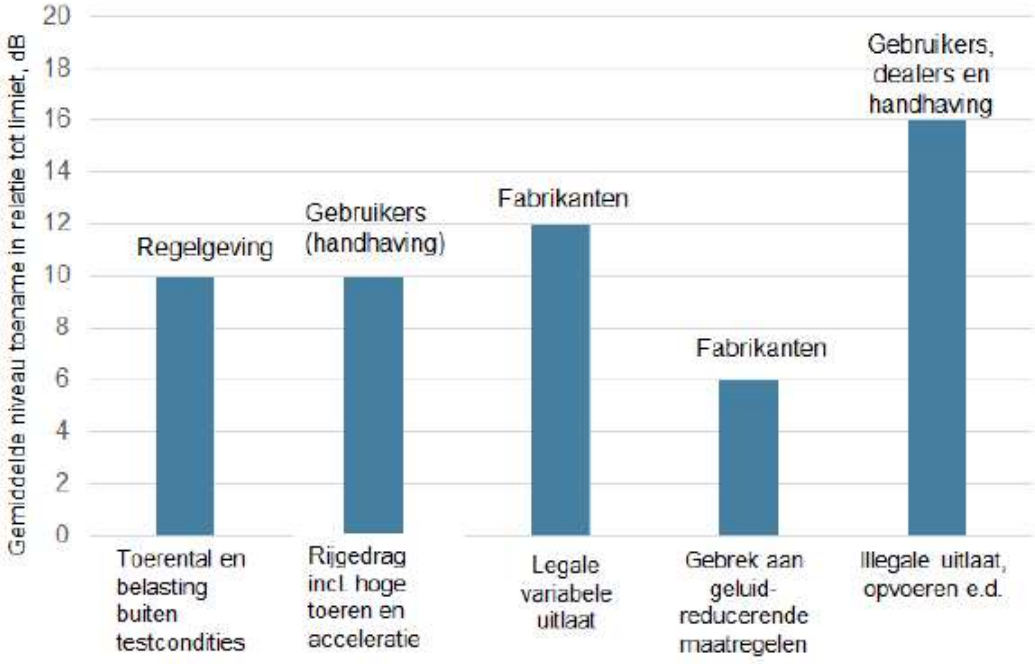
Deze metingen in figuur 5 van gebruikelijke passages komen goed overeen met de verwachtingen, zoals weergegeven in onderstaande figuur. Hier wordt de verwachte geluidemissie op 7,5 meter gegeven bij verschillende snelheden. In het meetgebied lag de snelheid tussen de 30 en de 50 km/h. Rond de 50 km/h, gaat het bandengeluid overheersen bij de reguliere auto's. Dit is ook geconstateerd.



Figuur 6: Voorbeeld van verhouding motor en bad/wegdekgeluid bij matige acceleratie van een personenauto op dicht asfalt. Bron: kortbeek: et al, 2000

Bij de geluidpieken boven de 80 dB(A) is dit volledig anders. Bij het uitluisteren en terugkijken was hier sprake van sportauto's, snel accelereren of van auto's met aangepast uitlaatsysteem (sportuitlaat) en/of het moedwillige veroorzaken van ploffen/knallen uit de uitlaat. Dit laatste kwam bij tussen de 20% en 25%[8] van de pieken voor.

Auto's kunnen in de praktijk door verschillende oorzaken meer geluid produceren dan uit de passeertesten naar voren komt. In de notitie[9] TNO is dit uitgezocht. Onderstaande grafiek is uit deze notitie overgenomen.



Figuur 7: Oorzaken van de overschrijding van het typekeuringsniveau L_{urban}, indicatief in dB, met relevante partijen: hoge toerentallen, rijgedrag en acceleratie, legale variabele uitlaten, gebrek aan geluidreducerende maatregelen, en illegale uitlaten of gemanipuleerde aandrijving (brandstofsysteem, toerenbegrenzer etc.).

Als alle factoren samen komen leidt dit tot een toename van 16 dB(A). Bij oude auto's zouden dus geluidsniveaus tot 95 dB(A) kunnen voorkomen. Bij het huidig wagenpark is het zeer aannemelijk dat bij passages met geluidniveaus boven de 90 dB(A) niet aan de geluidemissie-eisen wordt voldaan. In figuur 3 is de verdeling van gemeten geluidniveaus voor auto passages weergegeven. Hierbij zijn niveaus tot 100 dB(A) gemeten, met zelf enkele uitschieters hierboven.

Opvallend in de meting is dat piekniveaus van meer dan 80 dB(A) door trucks of vrachtwagens nauwelijks zijn geconstateerd. Wel zijn er op enkele plaatsen piekniveaus geconstateerd van de achteruitrij-signalering van vrachtauto's.

Bij het terugkijken van de filmfragmenten van de piekgeluiden (in totaal meer dan 2500), is geconstateerd dat ogenschijnlijk dezelfde voertuigen vaak in beeld kwamen. Er bestaat het vermoeden dat de geluidpieken vaak door dezelfde groep auto's wordt veroorzaakt. Het lijkt hier te

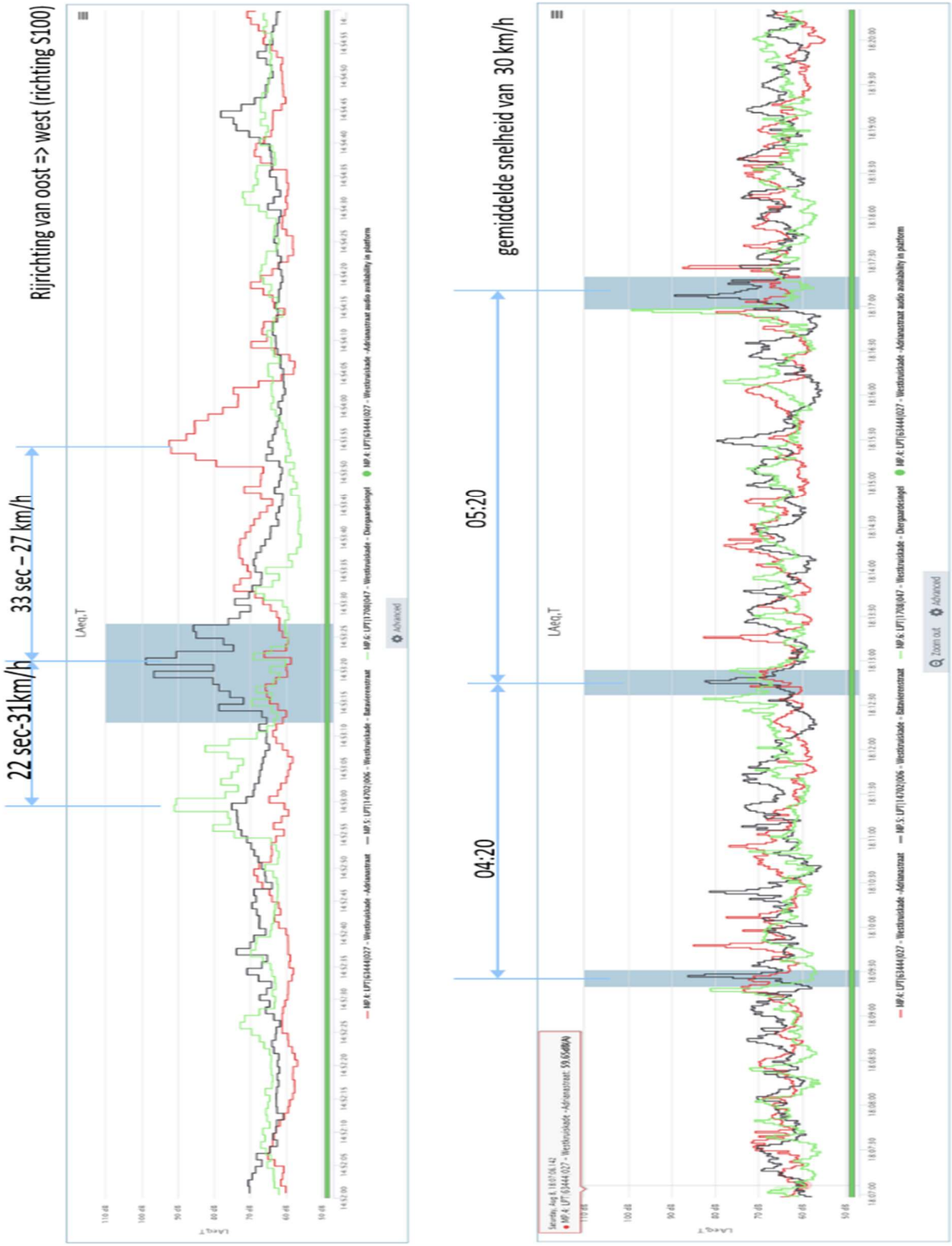
[8] Pas na 50% van het uitluisteren van piekgeluiden zijn de knallen apart geregistreerd. Dit is een totaal van 15%. Op basis hiervan is geëxtrapoleerd naar de al reeds uitgeluisterde geluiden, waardoor het totaal aantal bij auto's op 25% wordt geschat.
[9] Notitie Praktijkemissies geluid van tweewielers en auto's, DHW-2019-100320199

gaan om een honderdtal voertuigen. De beelden waren om privacy redenen bewust onscherp, waardoor dit niet met zekerheid kon worden vastgesteld. Op bepaalde dagen leek dezelfde auto rondjes te rijden. Een voorbeeld hiervan is hieronder weergegeven.

Figuur 8: Detectie op basis van camera beelden, waar ogenschijnlijk dezelfde auto rondjes rijdt (tot 15 keer) en piekgeluiden veroorzaakt. (metingen op 8 Augustus 2020).

Er is niet specifiek op de snelheid gelet. Met het geplaatste meetsysteem was dat ook lastig te onderzoeken. Als een auto meerdere punten passeerde kon een inschatting worden gemaakt van de snelheid. Voor de auto die rondjes reed uit het eerdere voorbeeld is dit gedaan. Deze auto had een snelheid van ongeveer 30 km/uur.

Over het algemeen ontstond het beeld dat de snelheid, mede door de omstandigheden, tussen de 30 en 50 km/uur lag.



Figuur 9: Steekproef voor berekening snelheid op basis van passages langs meerdere meetposities.

Motoren

Motoren veroorzaken geluidpieken. Anders dan bij auto's liggen deze pieken voor de meeste motoren boven de 80 dB(A). Op basis van de camerabeelden is 80% van de motorpassages boven de 80 dB. Belangrijkste reden hiervoor is dat de vergunde geluidemissie-niveaus van motoren hoger ligt dan bij auto's en afhankelijk is van het bouwjaar, type en cilinderinhoud. De spreiding van piekgeluiden is vergelijkbaar met die van auto's boven de 80 dB(A).

Hierdoor is het moeilijker te constateren of en in welke mate er overschrijdingen zijn, mede door de grotere spreiding van emissienormen.

De geconstateerde motoren kennen een hoge variëteit aan type motoren. In deze categorie zijn ook quads, trikes (motoren met drie wielen) en crossmotoren opgenomen. Ook bij motoren is het knallen in de uitlaat geconstateerd, zij het met een aanmerkelijk lager percentage dan bij de luide auto's.

Onnodig gas geven (bijv. bij stilstand) of zeer snel accelereren is ook hier geconstateerd, maar wel aanmerkelijk minder dan bij auto's. Stunten met motoren/bromfietsen (zoals het rijden op één wiel) is meerdere keren geconstateerd. Motoren kwamen ook vaak in groepen van 3 tot 15 stuks voorbij, deze zijn dan in de statistiek als één geluid gebeurtenis geteld.

Opgemerkt moet worden dat de hinder door motoren er waarschijnlijk niet minder door is. Mogelijk zelfs meer doordat motoren overwegend lagere frequenties produceren, die door de lagere demping makkelijker de woning binnendringen.

Bromfietsen

Ongeveer 10% van de geluidpieken zijn veroorzaakt door bromfietsen. De niveaus liggen tussen de 80 en 85 dB(A) (en veel bromfiets-geluiden zitten hier ook nog onder). Omdat bromfietsen in de regel dichter langs de kant rijden is de afstand tussen de bron en de geluidsmeter kleiner. De niveaus zijn hiervoor gecorrigeerd (minus 2 dB).

Opvallend is wel dat bromfietsen in enquêtes veelvuldig als hinderlijk worden ervaren. In "de atlas van de leefomgeving"[10] wordt deze categorie als meest hinderlijke geluidsbron aangemerkt. Uit deze meting blijkt echter dat bij piekniveaus boven de 80 dB(A) het gemeten aantallen van motoren en (getunede) auto's tot 4 keer hoger ligt dan bromfietsen.

Claxons

Claxonneren is veelvuldig waargenomen. Dit zorgde voor ongeveer 10% van de geluidpieken. De gemeten niveaus van claxons lagen rond de 83 dB(A). Naast het beoogde gebruik zijn 50 tot 100 toeter-concerten (langdurig toeteren met meerdere auto's) geconstateerd die tientallen seconden tot minuten konden aanhouden.

[10] https://www.atlasleefomgeving.nl/kaarten Geluidhinder bromfietsen/scooters per gemeente

Tram

Trampassages zijn geconstateerd maar deze lagen overwegen onder de 80 dB(A). Een enkele keer kwamen deze hier bovenuit en zijn ze meegeteld. In de bocht bij de West-Kruiskade (bij Diergaardesingel) zijn frequent piekgeluiden aangetroffen door piepende wielen van de tram die hier de bocht neemt. Mogelijk zijn door werkzaamheden aan de tramrails aan de Nieuwe Binnenweg ook minder geluidpieken door de tram waargenomen.

Andere geluiden

Een aantal keren (tientallen) zijn autoalarmen geconstateerd, veelal waren de geluidniveaus op de meter 80 dB(A) of lager (direct afhankelijk van de afstand). Opvallend was wel dat nagenoeg in alle gevallen het autoalarm afging direct na passage van een luidruchtige auto.

Naast de hierboven beschreven geluiden zijn een veelvoud van ander piekgeluiden geregistreerd. De belangrijkste hiervan waren sirenes (ambulance, Politie, Brandweer) 2%. Andere gesignaleerde geluiden waren helikopters, kerkklokken, bouwwerkzaamheden, hard blaffende honden, muziek en een enkele truck. Een aantal pieken werd veroorzaakt door de acteruitrij signalering van vrachtwagens.

Deze aantallen waren laag en zijn niet meegenomen in de analyses. Uit de analyses van TNO (zie bijlage 1) blijkt dat er een veel grotere diversiteit van geluiden is als de grenswaarde waarover wordt geclassificeerd wordt verlaagd.

Verdeling van geluidsbronnen over de tijd

De piekgeluiden deden zich over de hele periode van de dag voor, maar vooral in de late middag, avond en begin van de nacht. Het hoogste aantal geluidpieken (tot 6 per uur) werd tussen 19:00 en 22:00 bereikt, waarna een geleidelijke daling volgde. Pas na 02:00 werd het rustiger.

Er is een duidelijk verband tussen het weer en het aantal pieken. Bij droog en mooi weer is het aantal pieken hoog. Het nam aanmerkelijk af (tot minder dan 20% toen het weer eind September omsloeg), maar verdween niet volledig. Op vrijdag en zaterdag zijn de meeste geluidspieken gedetecteerd.

Onderstaande tabel geeft inzicht in het gemiddelde en maximale aantal pieken per uur, gemeten over de drie verschillende straten en perioden van de dag.

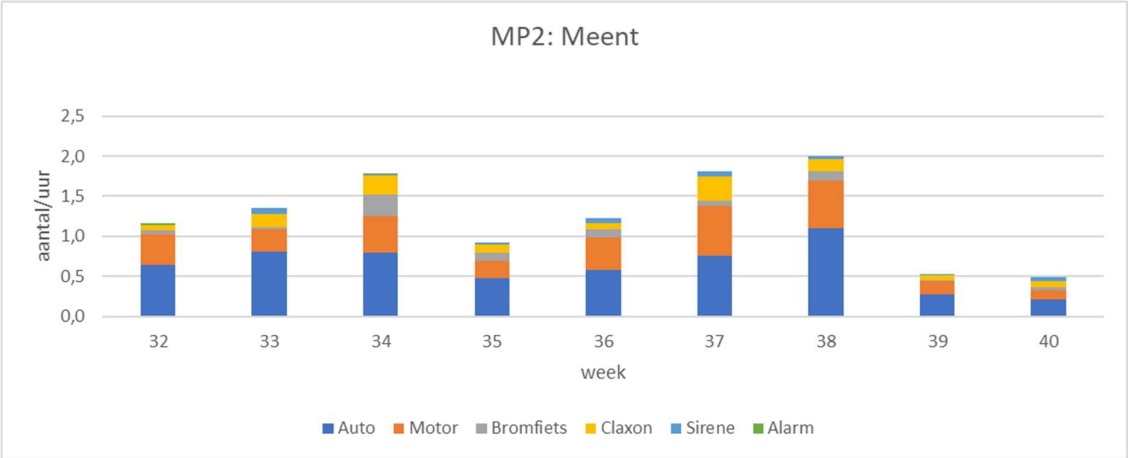
	Dag(15:00-19:00)		Avond(19:00-23:00)		Nacht(23:00-02:00)	
	Gem	Max	Gem	Max	Gem	Max
Meent	1,3	4,0	1,7	5,3	0,9	3,7
West Kruiskade	3,0	7,0	4,0	10,3	1,8	5,0
Nieuwe Binnenweg	1,3	3,8	1,6	4,5	0,8	2,3

Tabel 2 Gemiddeld en maximaal aantal geluidpiek geregistreerd gedurende de meetperiode voor de drie straten op de dag, de avond en de nacht.

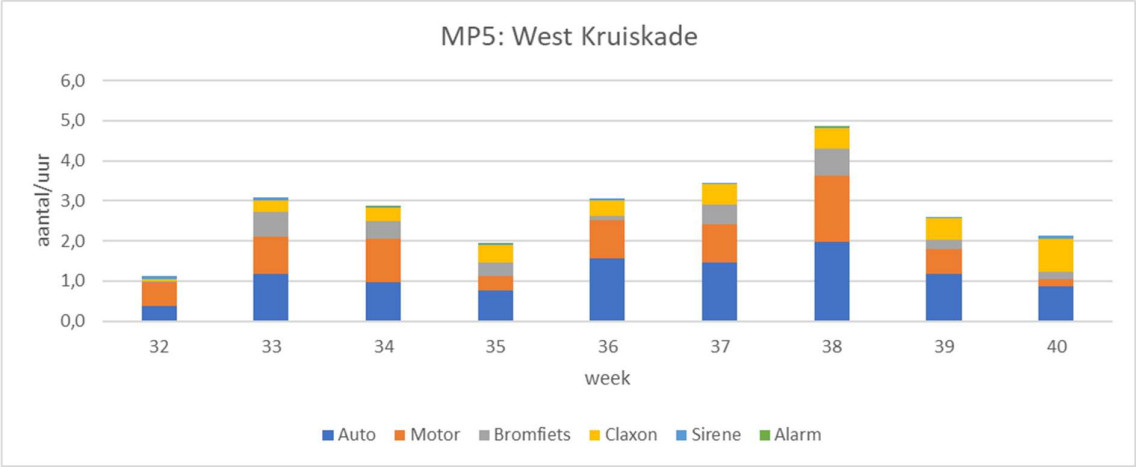
Onderstaande grafieken geven de verdeling van geluidpieken naar bron en weeknummer, voor de drie verschillende straten. Hierbij is steeds één meetpunt gekozen (om dubbeltelling te voorkomen), waarvan de betrouwbaarheid met betrekking tot de bron het hoogst is . Dit betreft de twee locaties met camera en één locatie aan de Binnenweg.

In de grafieken is de sterke correlatie met de weersomstandigheden zichtbaar. Week 35 was een regenachtige week. In week 39 was er een weersomslag naar een aanmerkelijk kouder en natter weerbeeld.

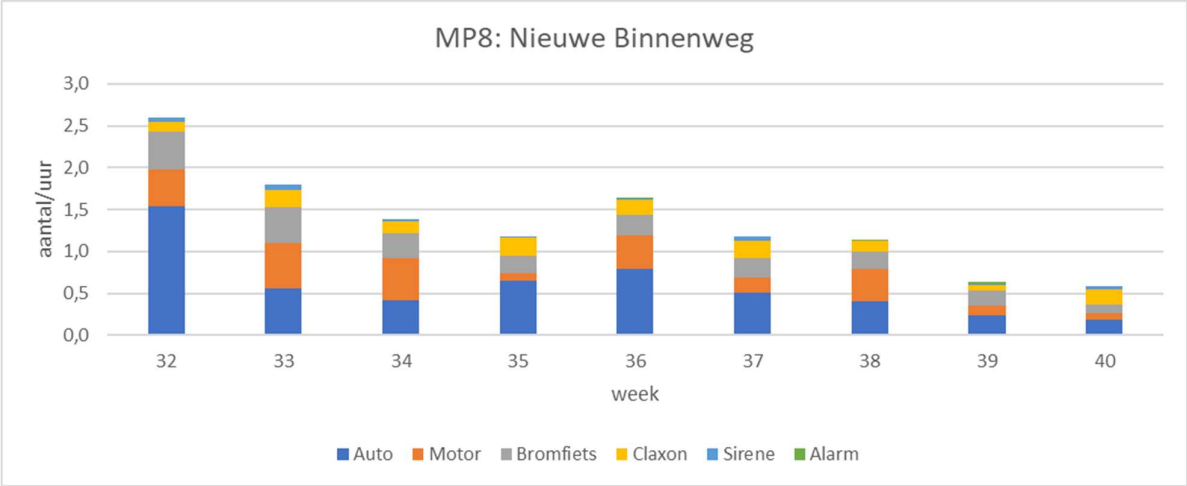
De grafieken zijn uitgesplitst naar locatie. Let op: de schaal van de grafieken is niet gelijk.



Figuur 10: Verdeling van de geluidpieken over de verschillende bronnen voor het meetpunt 2 (Meent/Delftsevaart) over de weken 32 tot 40, in pieken per uur.

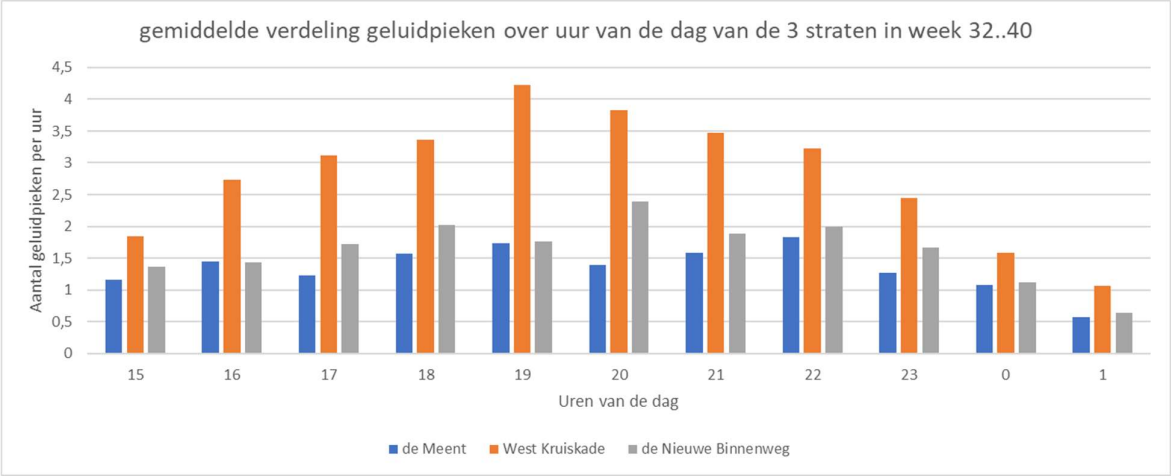


Figuur 11: Verdeling van de geluidpieken over de verschillende bronnen voor het meetpunt 5 (West-Kruiskade/Batavierenstraat) over de weken 32 tot 40, in pieken per uur.



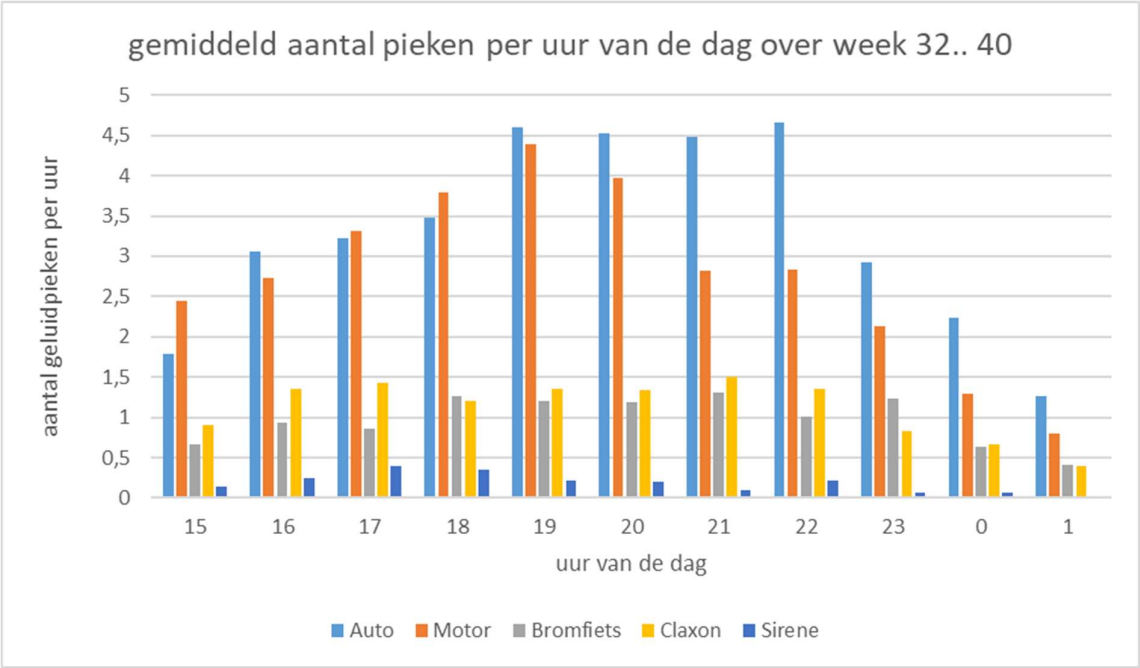
Figuur 12:Verdeling van de geluidpieken over de verschillende bronnen voor het meetpunt 8 (Nieuwe Binnenweg/Gouvernestraat) over de weken 32 tot 40, in pieken per uur.

In figuur 12 is de verdeling van het aantal piekgeluiden naar uur van de dag aangegeven, voor de drie straten. Hier is duidelijk te zien dat de geluidspieken in middag geleidelijk toenemen tot een piek in de avond en dan geleidelijk afnemen. Deze piek in de avond is verschillend per straat in de West Kruikade ligt deze tussen 19:00 en 20:00. Bij de Nieuwe Binnenweg is dit één uur later en in de Meent nog één uur later.



Figuur 13: Verdeling van geluidspieken naar uur van de dag.

In Figuur 13 is de verdeling per geluidsbron per uur aangegeven. Piek geluiden van auto's zijn gedurende de gehele avond dominant en nemen pas na 23:00 geleidelijk af. Bij motoren ligt de piek rond 19:00 en neemt dan af. Bromfietsen hebben een lichte piek in de avond.



Figuur 14: Verdeling van geluidspieken van de belangrijkste bronnen naar uur van de dag

Verdeling naar straat, dagperiode en week

Veruit de meeste geluidpieken zijn geregistreerd op de West-Kruiskade, ruim 50% gevolgd door de Meent en de Nieuwe Binnenweg, ieder met 25%. Piekgeluiden per uur vinden het meest overdag, plaats (meetperiode van 15:00 tot 19:00). In de avond (19:00 - 23:00) neemt het met ruim de helft af, maar daalt niet verder in de meetperiode in de nacht (23:00 - tot 02:00). De hinder blijft dus ook aan het begin van de nacht bestaan.

In onderstaande grafieken zijn per straat de geluidpieken per uur en per week, voor de dag, avond en nacht weergegeven. De meetgegevens beslaan de weken 32 tot 40, week 32 was incompleet.

De West-Kruiskade is hier het zwaarst belast. Op de dag zijn er tussen de 3 en 8 pieken per uur waargenomen. Zelfs in de nacht zijn er weken geweest waarbij de pieken elke 20 tot 30 minuten optraden.

Week	Maandag	Dinsdag	Woensdag	Donderdag	Vrijdag	Zaterdag	Zondag	Totaal	aantal/uur
32	0	0	0	0	1	39	9	49	0,6
33	28	44	40	24	42	47	15	240	3,1
34	28	28	14	31	62	39	23	225	2,9
35	20	13	16	19	26	32	23	149	1,9
36	23	20	52	16	55	47	41	254	3,3
37	24	27	23	35	53	53	51	266	3,5
38	65	76	30	39	54	59	51	374	4,9
39	41	47	16	18	29	33	16	200	2,6
40	27	15	19	8	54	37	18	178	2,3
Aantal/uur	2,6	2,7	2,1	1,9	3,8	3,9	2,5		

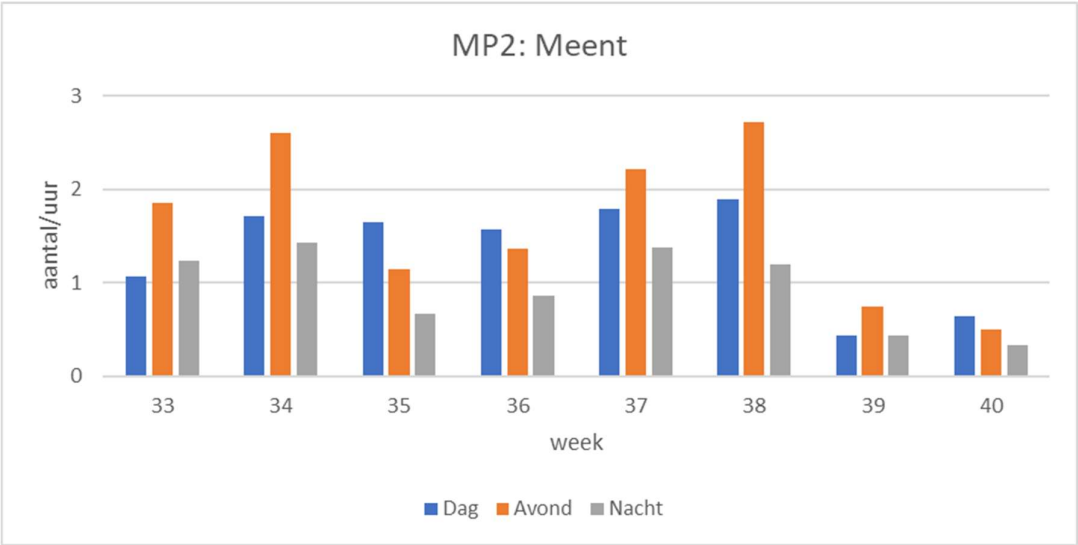
Tabel 3: Geregistreerde pieken van meetpunt 5 West Kruiskade/Batavierenstraat per dag

Week	Maandag	Dinsdag	Woensdag	Donderdag	Vrijdag	Zaterdag	Zondag	Totaal	aantal/uur
32	0	0	0	0	19	16	16	51	0,7
33	27	17	20	10	18	8	8	108	1,4
34	18	32	15	20	33	19	14	151	2,0
35	16	8	10	17	16	11	14	92	1,2
36	6	13	15	7	26	16	17	100	1,3
37	16	4	13	13	28	25	42	141	1,8
38	25	24	10	10	35	26	24	154	2,0
39	5	9	4	2	11	6	5	42	0,5
40	2	8	4	5	7	5	8	39	0,5
Aantal/uur	1,2	1,2	0,9	0,8	1,9	1,3	1,5		

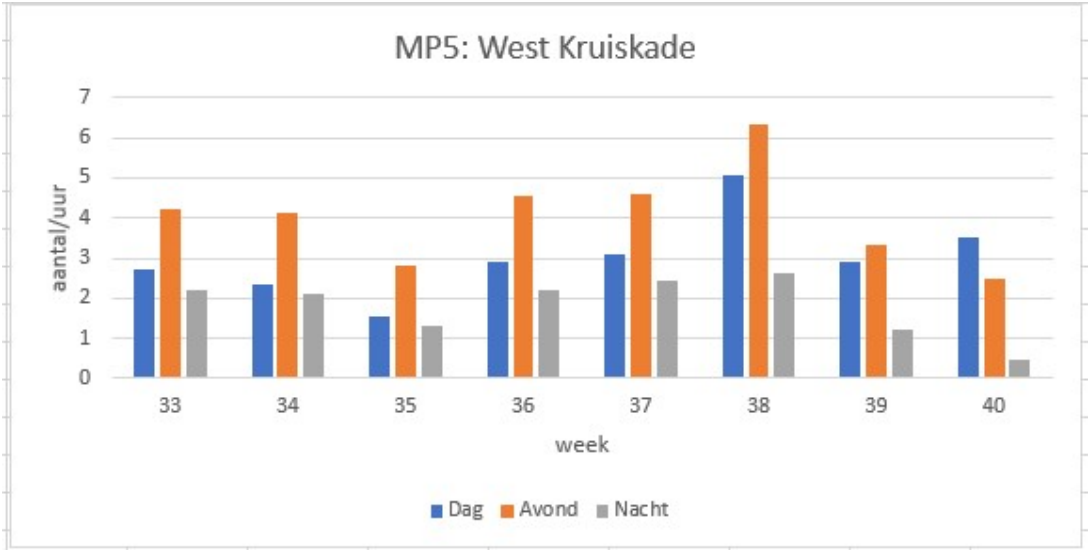
Tabel 4: Figuur 16 Geregistreerde pieken van meetpunt 2 Meent/Delftsevaart per dag

Week	Maandag	Dinsdag	Woensdag	Donderdag	Vrijdag	Zaterdag	Zondag	Totaal	aantal/uur
32	0	0	0	0	33	52	36	121	1,6
33	36	29	18	8	21	20	10	142	1,8
34	13	9	16	11	22	25	13	109	1,4
35	8	15	9	14	13	25	12	96	1,2
36	12	19	32	12	29	16	12	132	1,7
37	6	5	14	13	15	21	26	100	1,3
38	10	26	8	8	12	12	17	93	1,2
39	13	8	6	6	7	9	5	54	0,7
40	6	11	7	7	9	8	3	51	0,7
Aantal/uur	1,1	1,2	1,1	0,8	1,6	1,9	1,4		

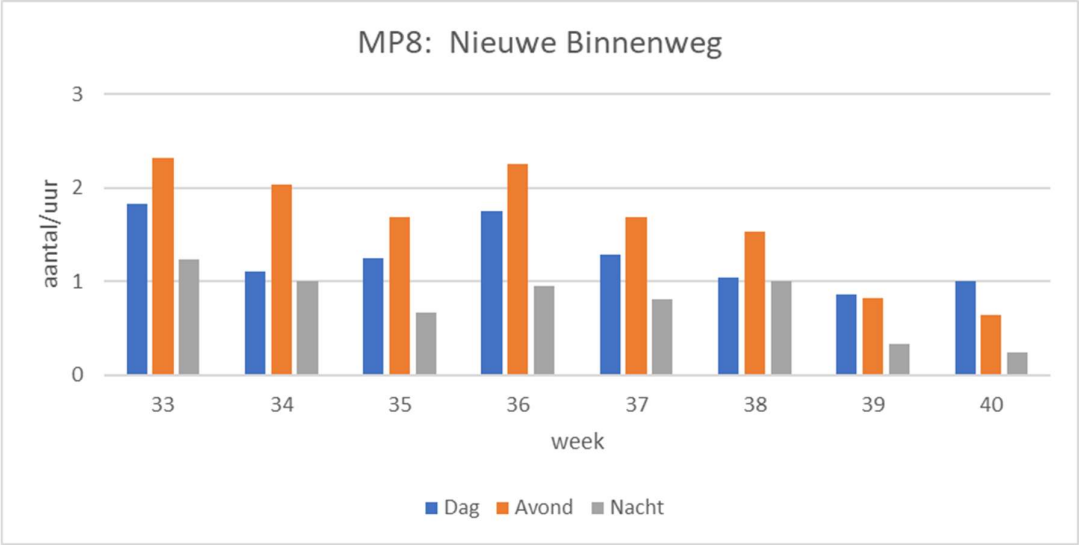
Tabel 5 Geregistreerde pieken van meetpunt 8 Nieuwe Binnenweg/Gouvernestraat per dag



Figuur 15: Verdeling van de geluidpieken over de verschillende perioden van het etmaal voor het meetpunt 2 (Meent/Delftsevaart) over de weken 33 tot 40 in aantal pieken per uur.



Figuur 16 : Verdeling van de geluidpieken over de verschillende perioden van het etmaal voor het meetpunt 5 (West-Kruiskade/Batavierenstraat) over de weken 33 tot 40 in aantal pieken per uur.



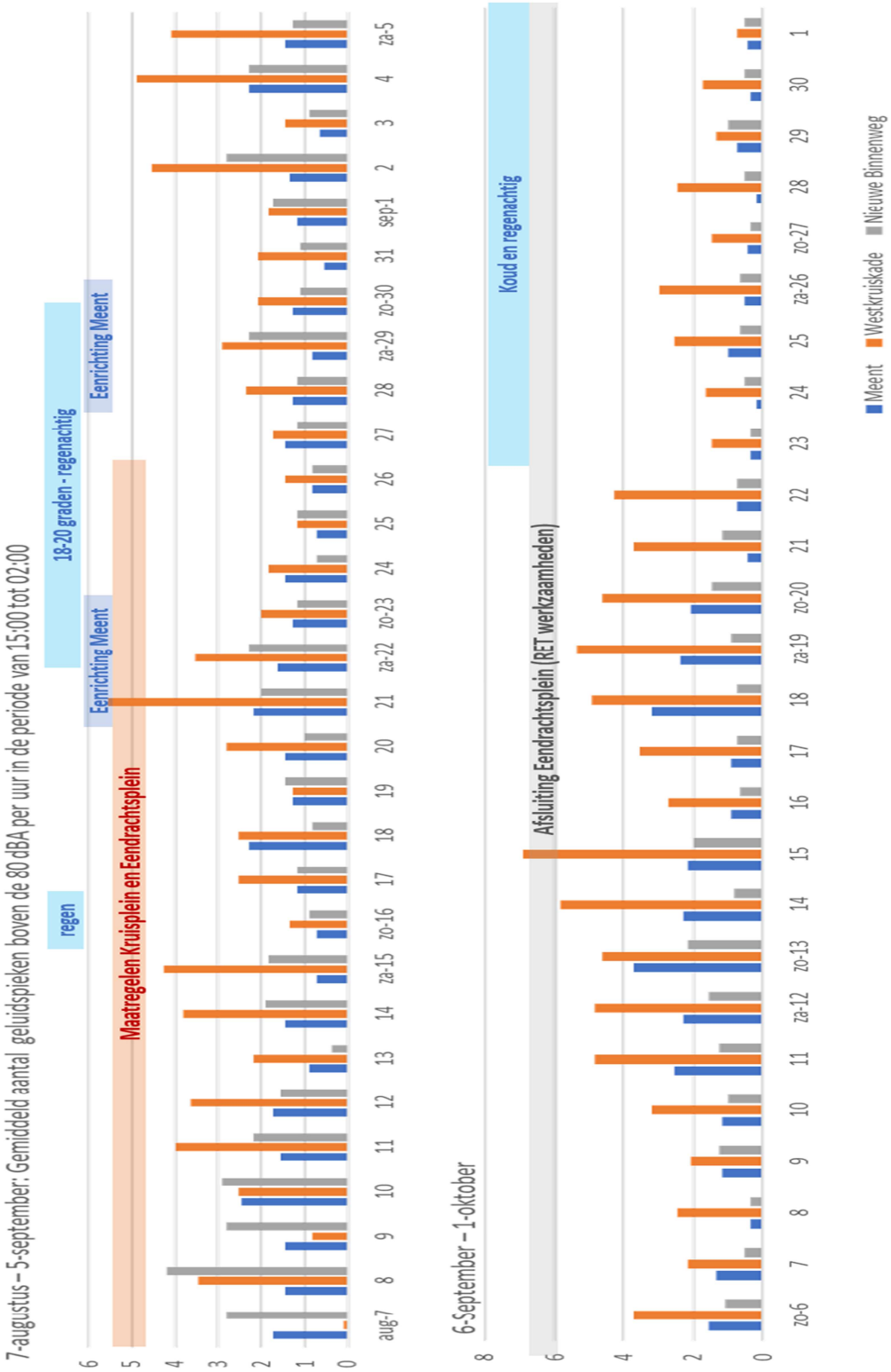
Figuur 17: Verdeling van de geluidpieken over de verschillende perioden van het etmaal voor het meetpunt 8 (Nieuwe Binnenweg/Gouvernestraat) over de weken 33 tot 40 in aantal pieken per uur.

Uit bovenstaande verdeling is goed te zien dat het aantal pieken fors afneemt in week 39 en 40. In de deze weken was het weer regenachtig en aanmerkelijk koeler dan daarvoor. Er zijn dus meer piekgeluiden op zonnige dagen dan regenachtige dagen.

Invloed van afsluitingen, weekend en bouwvak (1 tot 22 augustus).

Een meer gedetailleerd inzicht in het verloop van de pieken over de meetperiode voor elke straat is weergegeven in de onderstaande grafieken. In deze grafiek zijn ook de afsluitingen aangegeven. Op basis van deze grafiek is het effect van de afsluitingen voor de Meent en de maatregelen op het Kruisplein en het Eendrachtsplein niet goed zichtbaar. Voor de West-Kruiskade zien we na de afsluiting zwaardere belaste dagen dan tijdens de afsluiting. Maar omdat ook de bouwvakantie tot 21 augustus liep is er geen eenduidig vergelijk te maken. De afsluiting van het Eendrachtsplein (Nieuwe Binnenweg), in verband met de RET werkzaamheden, is wel goed zichtbaar.

Uit onderstaande grafiek kan ook worden afgeleid dat geluidpieken meer voorkomen op de vrijdag en zaterdag dan op andere dagen. Ook is de invloed van het weer is hier goed zichtbaar. Zowel het aantal pieken van auto’s als motoren vermindert dan.



Figuur 18: Verdeling van het aantal gemeten geluidpieken per dag voor de meetpunten MP2, MP5 en MP8, op respectievelijk de Meent, West-Kruiskade en de nieuwe Binnenweg in de periode van 7 augustus tot 1 oktober.

Invloed op geluidsklimaat

De standaardmethode om de hinder van verkeerslawaai in stedelijk gebied vast te stellen is een modelberekening van de gemiddelde geluidbelasting over een heel jaar, de L_{den}. Het geluid in de avond en nacht worden in deze berekening zwaarder gewogen.

Vanuit de berekende L_{den} is veel onderzoek gedaan naar het verband met percentages gehinderde. In de berekende L_{den} wordt geen rekening gehouden met andere geluidsbronnen in de omgeving en de in dit onderzoek gemeten piekgeluiden.

Omdat het erg belangrijk is voor een goede nachtrust, dat in ieder geval de nacht rustig is, wordt om inzicht te krijgen over slaapverstoring, naast de L_{den} ook de L_{night} gebruikt.

Voor inzicht in het werkelijke geluidsklimaat in stedelijk gebied zijn de L_{den} en L_{night} minder geschikt.

De L_{den} en L_{night} zijn berekende gegevens en geven geen inzicht in de piekgeluiden en de daaruit ontstane hinder. Hierdoor is in Europees verband een andere presentatie van het geluidsklimaat populair geworden, de Harmonica Index. Deze index is in 2015 in Europees verband ontwikkeld. Ook de gemeente Rotterdam heeft daaraan bijgedragen.

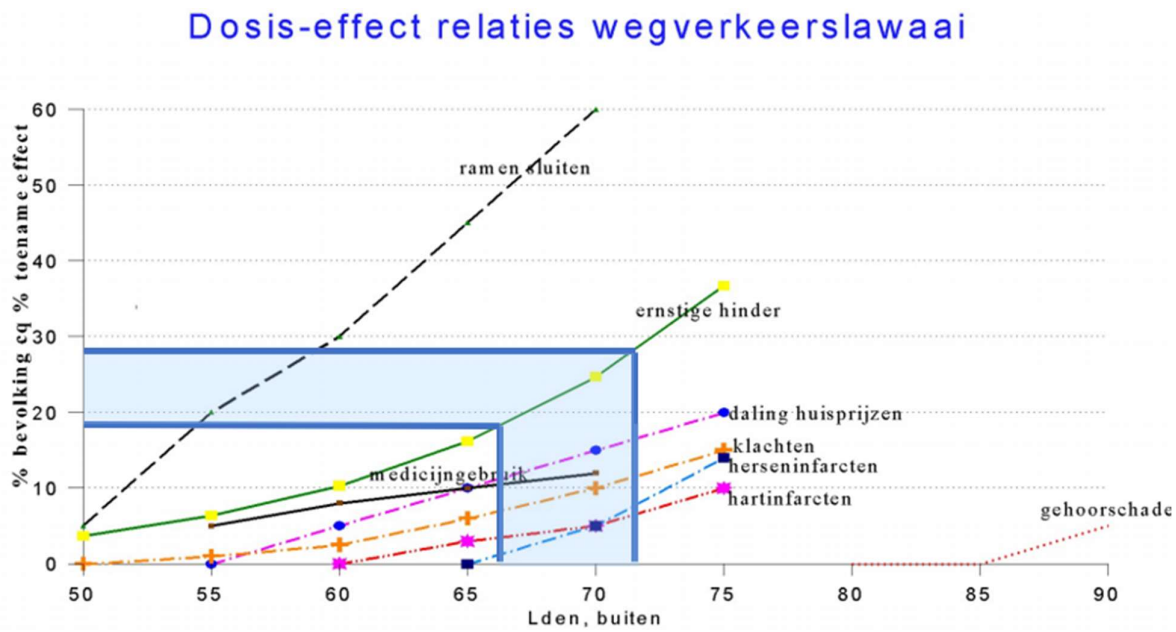
L_{den} en L_{night}

Het is mogelijk de L_{den} te meten en op dag, week en maand basis inzichtelijk te maken. Als de L_{den} wordt gemeten en per maand wordt gemiddeld, gelden de L_{den} niveaus in onderstaande tabel. Hierin is zichtbaar dat het geluidsniveau in oktober verminderd is, dit kan niet uit een verminderd aantal piekgeluiden worden verklaard, maar meer uit een verminderd verkeersaanbod en minder drukte. Voor de Nieuwe Binnenweg had dat direct te maken met de afsluiting i.v.m. de RET-werkzaamheden. In de hier berekende L_{den} en L_{night} worden alle geluiden uit de omgeving meegenomen.

L_{den} dB(A)	Meent			West Kruiskade			Nieuwe Binnenweg		
	Rodezand	Delfshaven	Binnenrotte	Adrianestraat	Batavierenstraat	Diergaardesingel	Gaffelstraat	Gouvernestraat	Westersingel
Augustus	72	67	70	66	71	70	66	66	68
September	70	67	69	66	71	70	64	63	67
Oktober	67	65	68	65	71	69	63	62	67

Tabel 6: Gemeten L_{den} waarden op de meetpunten MP2, MP5 en MP8 gemiddeld per maand.

Onderstaande grafiek geeft het verband tussen de gemeten L_{den} en geschatte aantal ernstig gehinderde. Voor de gemeten L_{den} niveaus ligt dat tussen de 18 en 28%.



Figuur 19: Dosis effect relatie wegverkeerslawaai. (bron: Ministerie van I&W, normering geluid, december 2011).

Als in de L_{den} metingen de piekgeluiden boven de 80 dB(A) niet worden meegenomen, verlaagt dit het L_{den} niveau met 0,2 tot 1,2 dB. Het effect op de Lden is dus gering, terwijl het duidelijk is dat hinder door deze piekgeluiden uitzonderlijk hoog is.

Voor het hinder-effect door piekgeluiden is het L_{den} niveau eigenlijk niet bruikbaar. Ook in eerdere rapporten is dit al geconstateerd.[11]

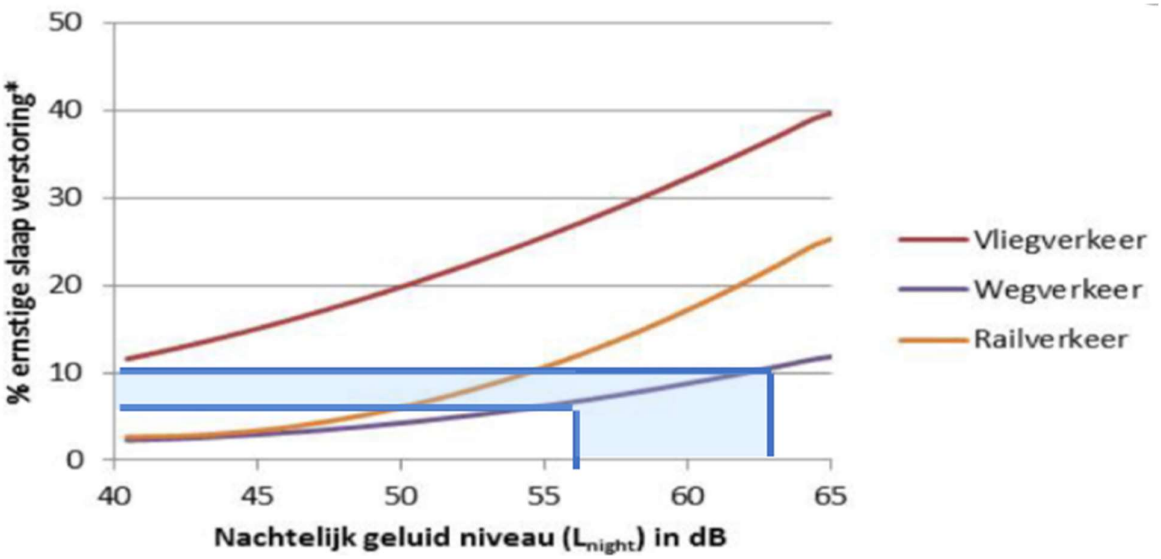
Naast de L_{den} kan ook de L_{night} in beeld gebracht worden. Dit is onderstaande tabel gedaan.

	Meent			West Kruiskade			Nieuwe Binnenweg		
L_{night} dB(A)	Rodezand	Delfshaven	Binnenrotte	Adrianestraat	Batavierenstraat	Diergaardesingel	Gaffelstraat	Gouvernestraat	Westersingel
Augustus	65	58		58	63	61	58	58	63
September	63	58	57	59	63	61	56	54	59
Oktober	58	56	57	56	62	59	53	52	52

Tabel 7: Gemeten L_{night} waarden op de meetpunten MP2, MP5 en MP8 gemiddeld per maand.

[11] Rapport: Praktijkemissies geluid van tweewielers en auto's, TNO 2019. DHW-2019-100320199

De L_{night} wordt veel gebruikt om een beeld te vormen van slaapverstoring. Ook hier is veel onderzoek naar gedaan. In onderstaande grafiek is deze relatie uitgezet. Bij de geconstateerde L_{night} niveaus zou er sprake zijn van tussen de 8 en 10% ernstige slaapverstoring.



Figuur 20: De realtie tussen nachtelijk geluid (L_{night}) en het percentage ernstige slaapverstoring door nachtelijk geluid, afgeleid door Basner & McGuire[12]

Ook in de L_{night} worden piekgeluiden, zoals die zich in Rotterdam voordoen, niet in het model meegenomen. Evenals de L_{den} is het effect van de piekgeluiden op de L_{night} gering en bedraagt tussen de 0,2 en 0,7 dB.

Het is zeer aannemelijk dat de slaapverstoring door de geconstateerde piekgeluiden hoger ligt dan uit de L_{night} kan worden afgeleid.

Er lijkt beperkt onderzoek gedaan te zijn naar de gemeten piekgeluiden en slaapverstoring. Mogelijk komt een onderzoek naar piekgeluiden van de industrie of transport (laden/lossen) nog het meest dichtbij. De hierin gehanteerde grenswaarden zijn 70, 50 en 45 dB(A) voor respectievelijk dag, avond en nacht. Voor pieken veroorzaakt door transport is ook in de avond en nacht maximaal 70 dB(A). Deze niveaus liggen ver onder de gemeten piekniveaus[13]. Een 2e onderzoek is uit oktober 1999, uitgevoerd door TNO[14]. Hierin wordt gesteld dat bij een maximaal geaccepteerd aantal tussentijdse ontwakingen van 30 per jaar, het LAmax niveau op de gevel minder dan 67 dB(A) (open raam) of 73 dB(A) bij gesloten raam dient te zijn.

Alle gemeten geluidpieken liggen hier fors boven.

[12] Basner M and McGuire S, WHO Environmental noise guidelines for the European region: a systematic review on environmental noise and effects on sleep. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018. 15(3): p. 519.

[13] Rapport Grenswaarden piekniveaus, Peutz 2016, RC 913-1-RA-002

[14] Beoordeling van geluidpieken in de woonomgeving, TNO-Rapport PG/VGZ/99.023

Harmonica Index

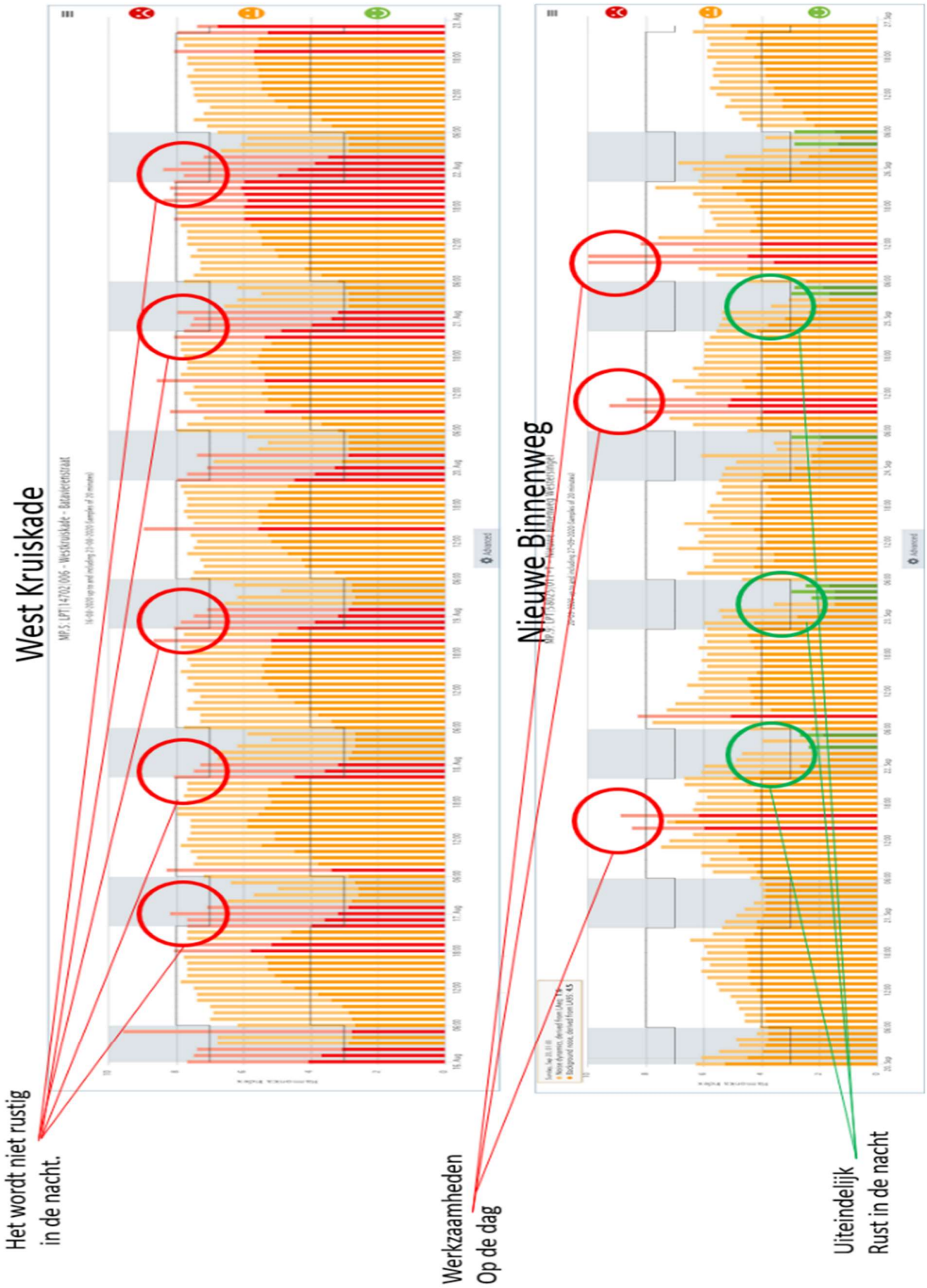
Een andere manier om de werkelijke geluidbelasting in beeld te brengen is de Europese Harmonica Index. De Harmonica Index wordt gemeten per uur en kent een dag en nacht periode en grenswaarden. De Harmonica Index maakt een onderscheid tussen het heersende achtergrondniveau en de dynamiek van het geluid. Dit samen geeft een beeld van het heersende geluidsklimaat op uur basis. Het voordeel van de Harmonica Index is dat deze al het geluid uit de omgeving meeneemt en een veel hogere tijdsresolutie kent, namelijk elk uur. De Harmonica Index wordt niet uitgedrukt in dB maar in een schaal van 1 tot 10.

De Harmonica Index is primair bedoeld om het geluidsklimaat voor omwonenden op een eenvoudige en heldere wijze inzichtelijk te maken en de participatie te bevorderen.

In figuur 23 zijn twee situaties als voorbeeld geschetst. De eerste grafiek is van de West-Kruiskade van 16 tot 23 augustus. De tweede grafiek is de Nieuwe Binnenweg in de periode van 20 september tot 27 september. Om het verschil te duiden zijn bewust verschillende weken gekozen.

Op de West Kruiskade is het geluidsklimaat slecht is tot zeer slecht in de avond en begin van de nacht. Dit is te zien aan de rode kolommen, die de grenswaarde overstijgen.

Op de Nieuwe Binnenweg wordt het rustiger in de nacht (groene balken). Op de dag is goed te zien wanneer er werkzaamheden van RET plaatsvonden.



Figuur 21: Harmonica-Index op van een week in Augustus en op de Nieuwe Binnenweg van een week in September

Bijlage 1: verkenning Audio Clustering door TNO

Peter Wessels – TNO Acoustics & Sonar

Inleiding

In de afgelopen jaren is het steeds eenvoudiger geworden om geluidniveaus langdurig te monitoren. Door gedurende lange tijd te meten wordt niet alleen een representatiever beeld opgebouwd, ook wordt duidelijk hoe de geluidniveaus variëren over de tijd. Doordat deze metingen vaak direct online toegankelijk zijn geeft dit ook de mogelijkheid direct op de meetwaardes te reageren.

Door geluidniveaus te monitoren worden grote hoeveelheden aan meetdata verzameld. Meetdata van een monitoring locatie is vaak beschikbaar met een hoge tijdresolutie (bijvoorbeeld één keer per seconde), en voor meerdere frequentiebanden (bijvoorbeeld tertsbanden). Om de meetdata toch overzichtelijk te presenteren worden nu vaak ééngetalswaarden van het geluidniveau getoond, zoals gemiddelden voor de dag, avond en nacht (L_{den}), of histogrammen van deze geluidniveaus. Verdere detailinformatie gaat hierbij verloren.

De volgende fase die in ontwikkeling is, is het automatisch kunnen duiden van de geluidniveaus. Dit moet de vraag beantwoorden welke geluidsbronnen de geluidniveaus veroorzaken. Aan de niveaus zelf is dit in het algemeen niet af te leiden.

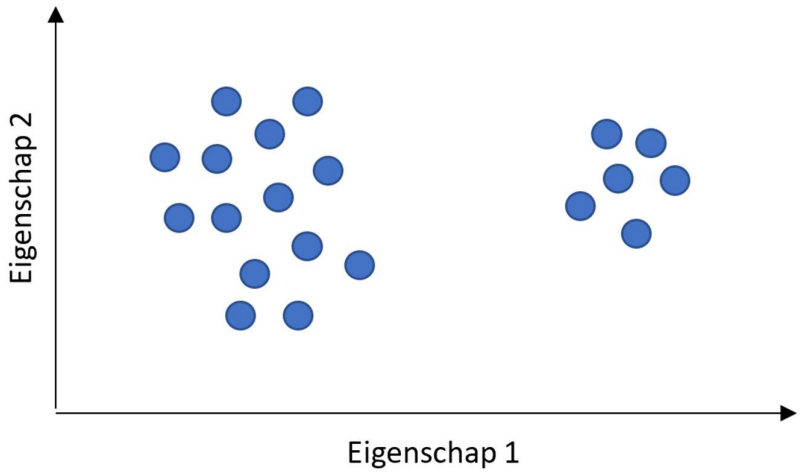
In deze bijlage volgt een omschrijving van het verkennende onderzoek naar het automatisch herkennen van piekgeluiden in het verkeer, dat TNO heeft uitgevoerd in opdracht van Munisense binnen het “Rotterdam piekgeluiden” project.

Machine learning

De ontwikkelingen op het gebied van machine learning en AI (artificiële intelligentie) hebben de betrouwbaarheid van automatische geluidherkenning sterk vergroot. Er zijn echter een aantal redenen waarom de meest betrouwbare aanpak (supervised learning) nog niet breed wordt toegepast op geluiden in de stedelijke omgeving (urbane geluid monitoringsdata):

- Het algoritme moet elk type geluid eerst leren herkennen. Hiervoor zijn zeer veel gelabelde geluid opnames nodig. Het maken van een training-set, met bijvoorbeeld 10.000 representatieve bromfiets passages, is een kostbaar proces.
- Geluid in de stad is divers en complex. Om alle (relatief) harde geluiden goed te kunnen duiden moeten al deze bronnen eerder al (met een training-set) geleerd zijn aan het algoritme. Vaak is op voorhand niet duidelijk welke bronnen voor een meetlocatie relevant gaan zijn (glasbak, spoorwegovergang, kerkklok, etc.).

In dit TNO-onderzoek is daarom een andere aanpak gebruikt. In deze aanpak worden alle geluidsfragmenten die duidelijk luider zijn dan het achtergrondniveau gegroepeerd in clusters met vergelijkbare eigenschappen (unsupervised learning). Een meetlocatie (fictief) waarbij slechts twee type geluiden dominant voorkomen (bijvoorbeeld claxons en kerkklokken) resulteert met deze methode in twee clusters van geluiden (zie Figuur 1).



Figuur 1: Schets van een cluster resultaat waarbij twee clusters zijn gevonden.

Dit heeft als voordeel dat:

1. Direct is te zien hoeveel clusters, dus hoeveel type geluiden, er zijn gevonden. Dit geeft aan hoe divers het geluid op de meetlocatie is.
2. De omvang van de clusters laat zien in welke mate de geluiden voorkomen.
3. Clusters kunnen mogelijk nog bestaan uit betekenisvolle kleinere clusters. Bijvoorbeeld een onderverdeling van auto's in benzine of dieselmotor, of voertuigen met of zonder bewerkte uitlaat.
4. Als van een paar geluiden in een cluster de bron bekend is, kunnen er (voorzichtig) aannames over de overige geluiden in het cluster worden gemaakt. Hiermee kunnen, met beperkte inspanning, veel soortgelijke geluiden worden gevonden.
5. Voor het maken van een training-set, met het oog op latere AI-toepassing, hoeft men niet meer alle data te evalueren, maar kan men zich beperken tot de geluiden van een relevant cluster.

De nadelen zijn:

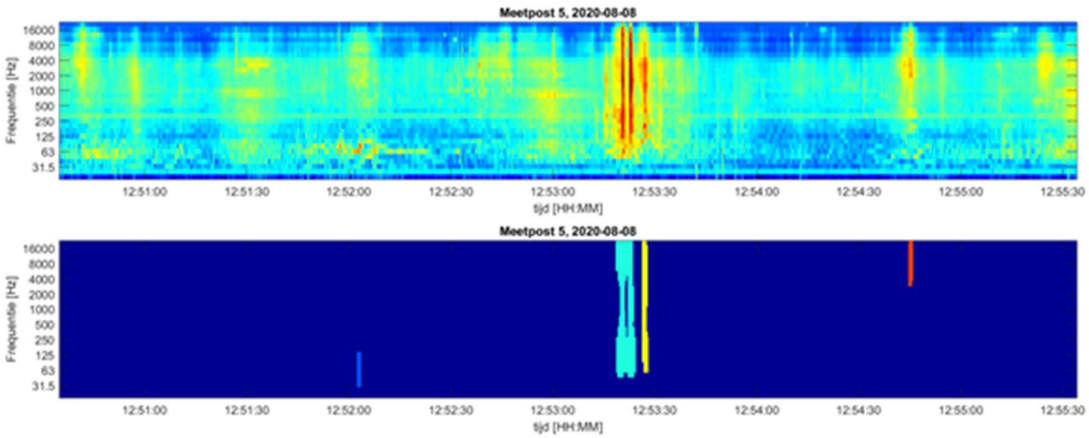
1. Er moet vooraf gekozen worden op basis van welke eigenschappen de geluiden worden geclusterd. Deze selectie van eigenschappen maakt het lastig om geluiden die heel verschillende eigenschappen hebben tegelijkertijd te clusteren. Voor het ene geluid is de tijdsduur een goede eigenschap (bijvoorbeeld een enkele slag van een kerkklok), voor het andere geluid juist niet (bijvoorbeeld verschillende voertuig passages).
2. Over de kwaliteit van de clustering kan pas na het evalueren van data in de clusters een uitspraak worden gedaan.
3. Het kan lastig zijn om te bepalen waar het ene cluster eindigt of ander sub-cluster begint.

Toegepaste methode

Voor de negen verschillende meetlocaties in Rotterdam was vooraf niet precies bekend welke geluiden hier zouden optreden en hoe deze geluiden zich van elkaar zouden onderscheiden. Daarom is er gekozen voor de unsupervised learning aanpak. De data in de resulterende clusters is vervolgens vergeleken met de een aantal handmatig toegevoegde labels van Munisense.

Aanpak:

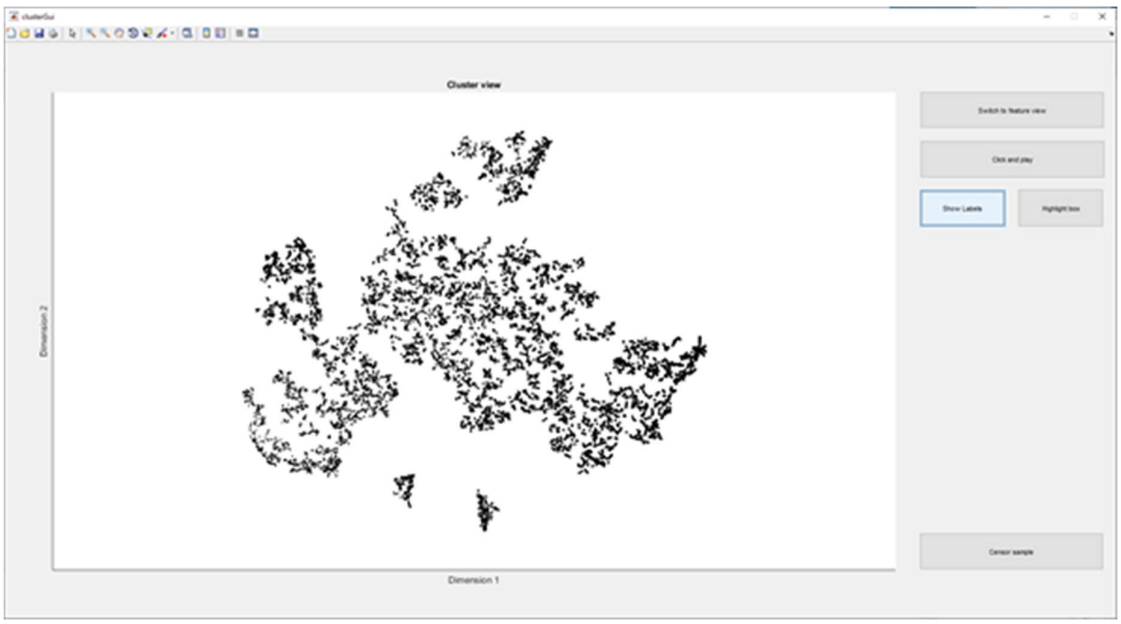
- Voor elke vijf minuten is per tertsband het achtergrondniveau bepaald. In dit project is hiervoor het L50 niveau gebruikt (het geluidniveau dat 50% van de tijd wordt overschreden).
- Geluidsfragmenten in het tertsbandspectrogram (intensiteit van het geluid in frequentie en tijd) die meer dan 10 dB boven deze achtergrond uitsteken zijn geselecteerd (zie Figuur 2). Het kan voorkomen dat er gelijktijdig op verschillende (niet aaneengesloten) frequenties geluid boven de selectiedrempel voorkomt. In dat geval worden deze geluiden elk los geselecteerd.
- Voor elke geselecteerd geluidsfragment is een veertigtal eigenschappen (features) berekend. Deze features, zoals de schatting van het motortoerental, richten zich vooral op het typeren van het motorgeluid van de voertuigen. Het geluidniveau zelf is niet gebruikt als feature omdat deze sterk afhangt van de afstand tot de bron.
- Op basis van de door Munisense toegekende labels over twee meetdagen is een selectie gemaakt van meest onderscheidende features. Hierbij is gekeken in welke mate alle motorfietsen en personenauto's aparte clusters vormde.
- Tot slot is alle meetdata (6 meetpunten, met in totaal 20 meetdagen), op basis van de geselecteerde features geclusterd en weergegeven in figuren.



Figuur 2: Voorbeeld van het selecteren van geluidsfragmenten. Boven: Spectrogram van 5 minuten. Rond 12:53:25 geeft een stilstaande motorfiets drie keer hard gas (rood in de figuur). Onder: weergave van de (vier) uitgeknipte fragmenten, elk met een eigen kleur.

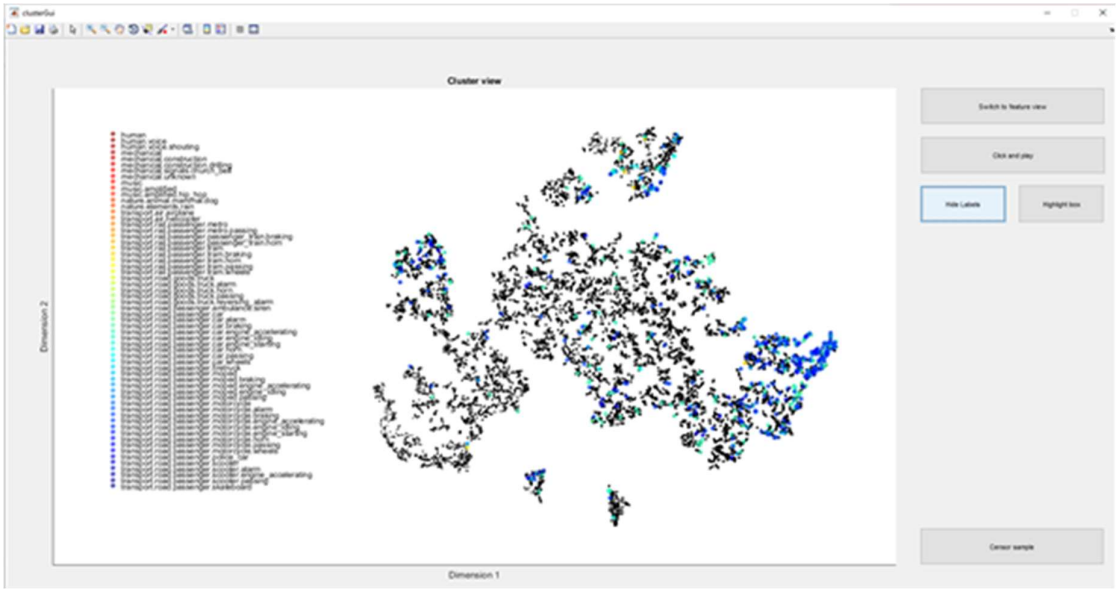
Resultaten

Figuur 3 toont de resulterende clusters geprojecteerd op een tweedimensionaal vlak. Elk van de 7700 zwarte stippen in de figuur is een fragment uit de opnames. Stippen die dichter bij elkaar staan hebben meer overeenkomstige feature waarden. Hoe groter de stip, hoe luider de het bijbehorende fragment. De figuur is een print screen van een tool waarin het mogelijk is de stippen aan te klikken en de fragmenten verder te evalueren, zo kunnen ook de waarden van onderliggende features worden geplot en vergeleken (hier niet verder besproken).

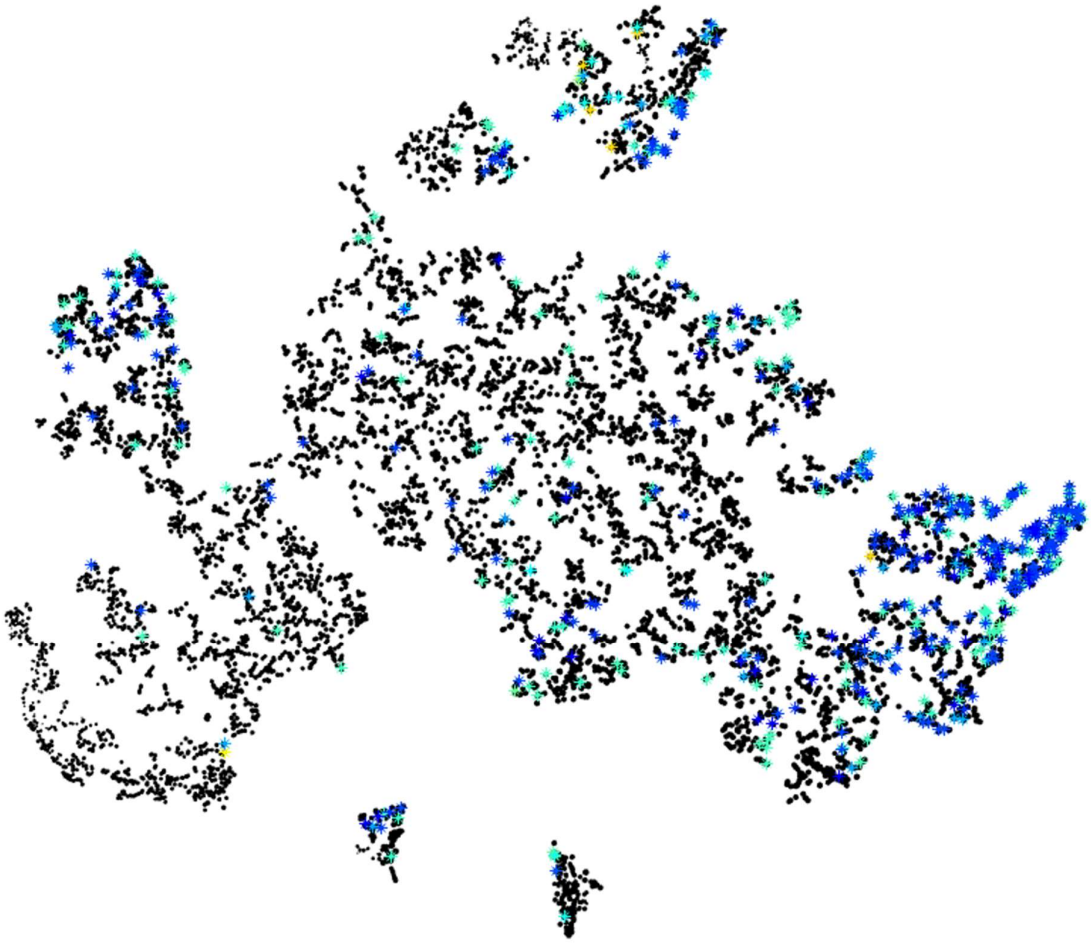


Figuur 3: Tweedimensionale weergave van de gevonden clusters. Elk stip vertegenwoordigt een fragment uit de opnames. Stippen die dicht bij elkaar staan zijn fragmenten met overeenkomstige feature waardes. Hoe groter de stip hoe luider het fragment.

In figuur 4 staat een combinatie van de clustering en de labels zoals geleverd door Munisense (datum: 15-10-2020, met kleur aangeven). Een uitvergroting van enkel de clusters staat in Figuur 5. Voor de situaties waarbij er overlap is in de tijd van een geselecteerd fragment en een gelabeld moment is dit label in de figuur overgenomen in kleur.



Figuur 4: Tweedimensionale weergave van de gevonden clusters, nu aangevuld met de labels van Munisense.



Figuur 5: Een uitvergroting van de clusters zoals getoond in Figuur 4

Een paar observaties:

- Met de toegepaste selectie van kortdurende hardere geluiden (L50 plus 10 dB) blijft in dit project hoofdzakelijk het geluid van verkeer over. Er is in dit geval geen heel groot (ander) cluster dat naar voren komt.
- De meerderheid van de door Munisense toegekende labels staat rechts in de figuur. Deze fragmenten bevatten het motorgeluid van optrekkende voertuigen.
- De diversiteit in het geluid van de voertuigen is groot. De wijze waarop men optrekt of enkel toeren maakt is van grote invloed.
- De labels van de twee meest voorkomende labels, motoren en personenauto's, liggen voor een deel door elkaar heen.
- Het blijkt vaak voor te komen dat een snel optrekkend voertuig resulteert in zowel een laagfrequent geluid (het motorgeluid) en een hoogfrequent geluid (gesuis) dat de selectiedrempel passeert. De labels van Munisense bevatten echter alleen een begin- en eindtijd, waardoor beide geselecteerde geluidfragmenten (motorgeluid en gesuis) hetzelfde

label hebben gekregen. Een groot deel van de geluidfragmenten in de rest van de figuur zijn daarom van een label voorzien doordat deze gelijktijdig met het motorgeluid zijn gevonden.

- Er zijn een aantal andere geluiden, zoals bijvoorbeeld claxons, gelabeld door Munisense, maar deze vormen geen duidelijk cluster. Dit komt omdat de features zich in eerste instantie hebben gericht op het motorgeluid, en daarmee ongevoelig zijn voor de eigenschappen van bijvoorbeeld claxons.

Conclusies en aanbevelingen

Bij het clusteren is in deze eerste analyse een selectie gemaakt van korte geluidsfragmenten die duidelijk luider zijn dan het achtergrondniveau. Omdat er, blijkbaar, geen andere geluidbronnen dominant aanwezig zijn resulteren hierdoor met name verkeersgeluiden. Daarmee wordt een vrij homogene verzameling aan geluiden gevonden, waardoor een duidelijk onderscheid tussen de clusters minder goed zichtbaar is.

De huidige clustering kan gebruikt worden om snel een selectie van relevante geluidsfragmenten te maken. Bijvoorbeeld, het cluster aan de rechter kant van figuur 4 bevat veel relevant motorgeluid. Wanneer nieuwe data wordt toegevoegd zullen de clusters groeien, terwijl duidelijk blijft waar de relevante data zich bevindt.

De gebruikte set van eigenschappen (features) richtte zich met name op de klank van de geluidsfragmenten. De aanname daarbij is dat vergelijkbare voertuigen een vergelijkbare klank hebben en daarmee clusters vormen. De klank hangt echter ook sterk af van hoe men bijvoorbeeld optrekt. Trekt men snel of langzaam op, geeft men geleidelijk gas of in stoten, rijdt men weg of maakt men alleen toeren. Dit gedrag zou in een tweede analyse gevat kunnen worden waarbij ook eigenschappen/ features moeten worden gezocht die hier ongevoelig voor zijn (bijvoorbeeld features die voor stemherkenning worden gebruikt).

De huidige clustering geeft beperkt onderscheid tussen personenauto’s en motorfietsen. Munisense heeft aangegeven dat dit verschil tijdens het labelen ook geregeld lastig te horen was, en dat de combinatie met videobeelden pas echt uitsluitsel gaf. Omdat Munisense maar een deel van de labels met behulp van videobeelden kon valideren hebben de labels zelf dus ook enige foutmarge.

Omdat per geselecteerd geluidsfragment de afstand tot de bron onbekend is, is een schatting van de bronniveaus lastig. Het gebruik van meerdere (richtings)microfoons of een microfoonarray zou deze informatie wel kunnen geven omdat daarmee de bronpositie te bepalen valt. De met afstand variërende gemeten geluidniveaus kunnen zo vertaald worden naar bronniveaus. Op basis van de bronniveaus is het bijvoorbeeld veel eenvoudiger om het onderscheid te maken tussen voertuigen met of zonder bewerkte uitlaat.

Tot slot, met een aanvulling op de gebruikte clustering techniek, genaamd sub-space clustering, is het mogelijk om de data op basis van meerdere combinaties van eigenschappen te clusteren. Hiermee vormen claxons, knallen, piepende remmen, sirenes, en het motorgeluid elk hun eigen cluster op basis van hun eigen onderscheidende eigenschappen.

Bijlage 2: Doorontwikkeling naar handhavingsinstrument

Een van de doelen van het project is om zicht te krijgen wat nodig is was om het monitoringsysteem door te ontwikkelen, zodat meer structureel (en stadsbreed) inzicht kan worden geboden in de hinderlijke piekgeluiden in de stad en het potentieel voor preventie en handhaving inzetbaar wordt.

Inzicht in geluidsklimaat en piekgeluiden in stedelijk gebied.

De gebruikte monitoringsystemen geven al inzicht in het geluidsklimaat, op basis van de besproken harmonica Index, L_{den} en L_{night} metingen. Daarnaast geeft het inzicht in de geluidniveaus en spectrale inhoud (frequenties van het geluid) op seconde basis. Hieruit kunnen gegevens over passage geluid (Sound Exposure Levels[15] SEL waarden) worden afgeleid, waardoor ook een statistisch beeld ontstaat over de mate en spreiding van de piekgeluiden. Met de huidige systemen kan dat nu al, deze geven alleen geen inzicht is de bron en exacte locatie van het piekgeluid.

Inzicht in de bron van het piekgeluid

Daarnaast is het nodig dat ook real-time herkenning van de bron plaats kan vinden. Juist hiervoor was deze meetperiode ook bedoeld. Hiervoor zijn in het meetproject duizenden geluidssamples verzameld waarmee geluidherkenning van de bron kan worden bewerkstelligd. Dit samen met het onderzoek van TNO biedt een goede basis om geluidherkenning mogelijk te maken. Voor het meeste brongeluiden zal dit met een hoge nauwkeurigheid kunnen (beter dan 95%). Dit geldt zeker voor knallende uitlaten, bromfietsen, claxons, sirenes, alarmen, motoren, auto's, etc. Voor geluiden die ook voor de mens lastig te onderscheiden zijn is nog nader onderzoek nodig, b.v. het onderscheid tussen motoren en getunede auto's, maar ook op basis van toerentallen.

Een belangrijk voordeel van automatische geluidsherkenning is dat deze herkenning in het monitoring station plaatsvindt, waardoor het uitluisteren van het audiosignaal in principe niet nodig is en de privacy wordt beschermd.

Gebruik als handhavingsinstrument

Bovenstaande functionaliteit maakt het systeem in beperkte mate al geschikt voor handhaving. Immers de omvang en plaats, sterkte van de piekgeluiden, of overlast zijn al real-time beschikbaar.

[15] SEL is een geluidmaat waarmee een geluidgebeurtenis gekenmerkt kan worden, waarbij rekening gehouden wordt met de duur van de gebeurtenis.

Geluid kunnen lokaliseren

Voor handhaving is het sterk gewenst dat de geluidsbron wordt gelokaliseerd, zodat er geen enkele twijfel bestaat over de exacte plaats van de overlast. Als deze met de juiste nauwkeurigheid kan worden aangewezen is ook de afstand tot de bron goed bekend en kan de bronsterkte nauwkeuriger worden teruggerekend. Een bijkomend voordeel van het kunnen lokaliseren is dat ook de snelheid grof kan worden bepaald. Munisense beschikt over een gepatenteerd 3D monitoring station, wat deze lokalisatie kan ondersteunen. In dit onderzoek was deze niet ingezet, omdat het in dit onderzoek vooral om het inzicht in de brongeluiden ging en het verkrijgen van zoveel mogelijk geluidsfragmenten.

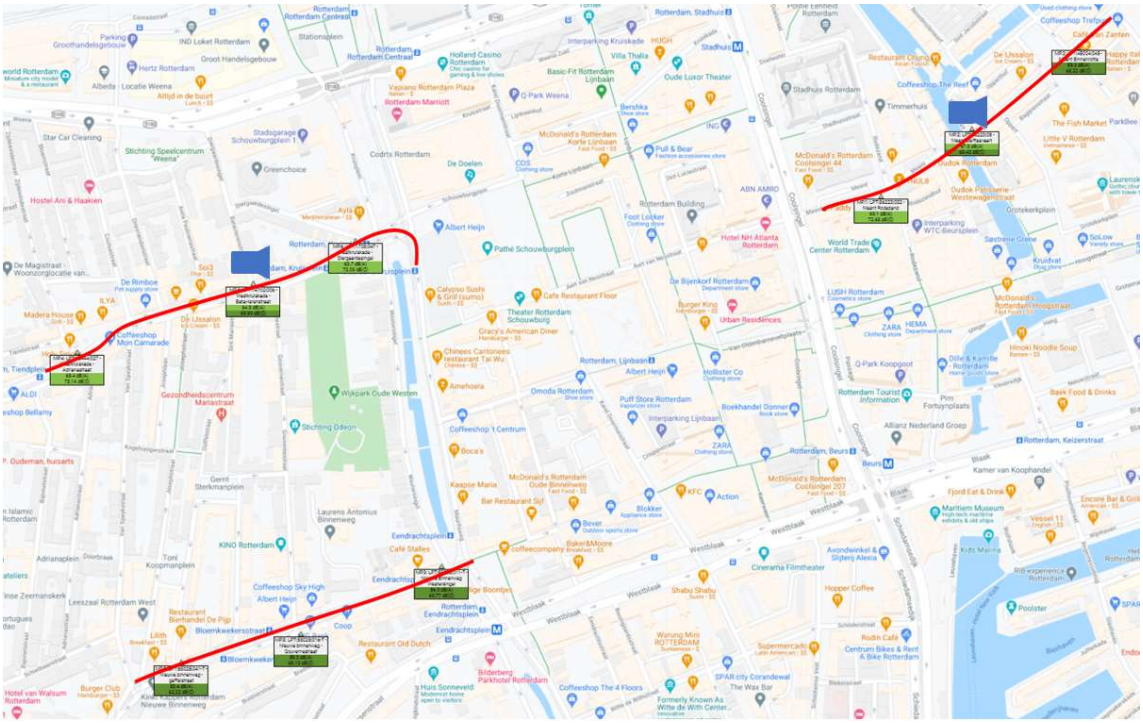
Voertuig identificatie

Het is mogelijk om bij herkenning van een overlast gevend piekgeluid ook een videobeeld vast te leggen. Dit kan op de wijze die in deze meetperiode is gebruikt, maar kan ook in real-time. Het geluid monitoringsysteem kan deze trigger verzorgen en koppelen met een camerasysteem. Afhankelijk van de beschikbare en toegestane resolutie zou identificatie op kenteken kunnen plaatsvinden om handhavend op te treden.

Deze trigger kan ook gevoerd worden aan een camerasysteem met kentekenherkenning, waardoor automatisch de identificatie van het voertuig kan plaatsvinden. Hiermee wordt in feite een geluidsflitspaal gerealiseerd.

Bijlage 3: Meetgebieden en meetposities

De metingen zijn uitgevoerd in drie straten; Meent, West-Kruiskade en de Nieuwe Binnenweg. Bij de keuze hebben klachten een rol gespeeld. Op onderstaande plattegrond zijn de meetlocaties aangegeven. Op twee posities was naast een geluid monitoring station ook een camera geplaatst (aangegeven met camera icoon op plattegrond).



Figuur 22: Overzicht van de meetposities op de plattegrond van Rotterdam

In onderstaande afbeeldingen zijn de meetposities in beeld gebracht. De rode rondjes geven de positie van de geluid monitoring stations aan en de groene rondjes de positie van de camera's. Er is gewerkt met camera's die 180 graden beeld gaven, waardoor de hele weg in beeld is.

Er is gebruik gemaakt van de Munisense klasse 2 geluid-monitoring-stations, die beschikken over uitluistermogelijkheid en opslag van WAV-bestanden. De geluid-monitoring-stations zijn voor het plaatsen en bij het weghalen gekalibreerd, en hierbij zijn geen afwijkingen geconstateerd.

De meetwaarden zijn gecorrigeerd, zodat de meetafstand tot de bron vergelijkbaar is met gemiddeld 7,5 meter (dichtstbijzijnde weghelft) en de meetpunten onderling vergelijkbaar worden. Onderstaande tabel geeft deze correcties voor de meetwaarden in dB weer, hierin is ook de correctie voor de gevelreflectie verwerkt waar dit van toepassing is.

In een extra kolom is aangegeven welke correctie op de meetwaarden moet worden toegepast om de belasting op de gevel te herleiden.

	Meet Hoogte	Bron Hoogte	Horizontale afstand tot gevel	Horizontale afstand tot bron	Afstand tot bron	Afstand gevel tot bron	Gevel reflectie correctie (dB)	7,5 m correctie (dB)	Correctie voor geluid op gevel
MP.1: Meent Rodezand	4,5	0,5	5	7,5	8,5	12,5	-0,9	0,2	-4,0
MP.2: Meent Deftsevaart	4,5	0,5	0	7,5	8,5	7,5	0	1,1	-1,1
MP.3: Meent Binnenrotte	4,5	0,5	0	10	10,8	10,0	0	3,1	-3,1
MP.4: Westkruiskade Adrianestraat	4,5	0,5	6	4	5,7	9,0	-0,5	-2,9	-2,6
MP.5: Westkruiskade Batavierenstraat	4,5	0,5	0	8	8,9	8,0	0	1,5	-1,5
MP.6: Westkruiskade Diergaardesingel	4,5	0,5	0	9	9,8	9,0	0	2,4	-2,4
MP.7: Nieuwe Binnenweg Gaffelstraat	4,5	0,5	5	5	6,4	10,0	-0,7	-2,1	-2,4
MP.8: Nieuwe Binnenweg Gouvernestraat	4,5	0,5	3	4	5,7	7,0	-1,1	-3,5	0,5
MP.9: Nieuwe Binnenweg Westersingel	4,5	0,5	3	5	6,4	8,0	-1,2	-2,6	-0,3
Referentie					7,5				

Tabel 8: Correcties op de meetwaarden, kolom 7,5m correctie is toegepast.

Nauwkeurigheid van de metingen

Metingen waren bedoeld als indicatief. Onderstaande effecten hebben invloed op de nauwkeurigheid.

Gebruikte monitoringsysteem

Gemeten is met klasse 2 monitoringsystemen, die voor en na de meetperiode zijn gekalibreerd. Hierbij zijn geen afwijkingen gevonden. Daarmee kan worden gesteld dat de metingen aan klasse 2 eisen voldoen, afhankelijk van frequentie geldt hier een maximale afwijking van 1,5 dB.

Terugrekenen naar 7,5 meter

De metingen zijn teruggerekend naar het geluid op de 7,5 meter afstand van de geluidbron in de veronderstelling dat het voertuig in het midden van de rijstrook rijdt. Dit laatste zal niet altijd het geval zijn geweest. Hierdoor ontstaat een onnauwkeurigheid.

Meerdere bronnen tegelijk

Het is vaak voorgekomen dat er meerdere bronnen actief zijn. Maar veelal waren de geconstateerde geluidpieken minimaal 20 tot 30 dB hoger dan de andere bronnen waardoor de invloed van andere bronnen verwaarloosd mag worden.

Terugrekenen naar bronsterkte

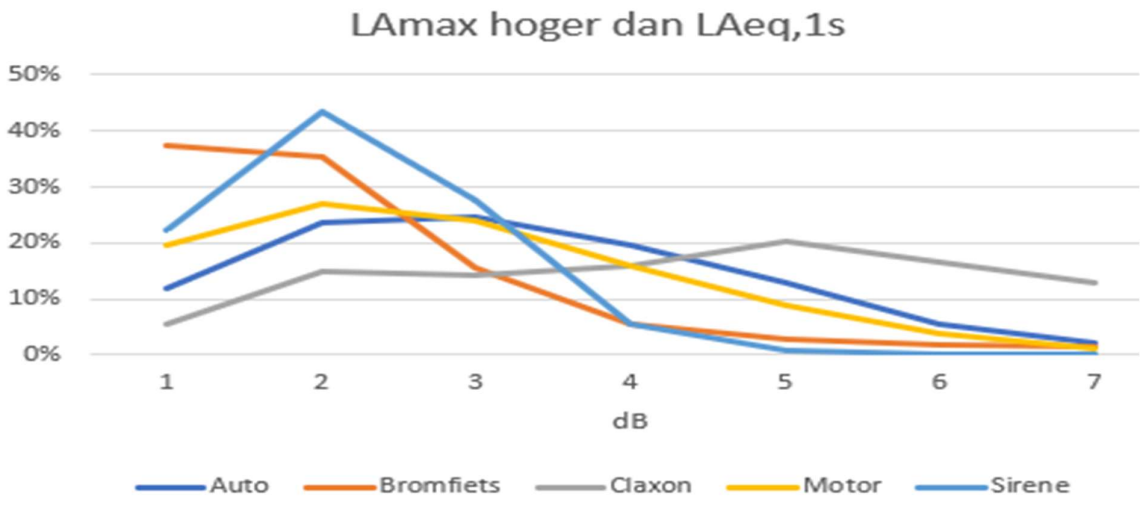
Een grove indicatie van de bronsterkte kan worden verkregen door terugrekenen van het meetpunt naar het voertuig. Hierbij kan het voertuig worden gezien als puntbron, daar de snelheid in de regel onder de 50 km per uur ligt. Dit mag als er met korte middelingstijd wordt gemeten. Bij een FAST-middeling is de effectieve meetduur van ¼ sec, dan is de verplaatsing 3,5 m. Over deze verplaatsing zal dit vrijwel geen invloed hebben op de gemeten geluidssterkte.

Bij het terugrekenen komt de bronsterkte uit op 18 dB meer dan gemeten op 7,5 meter. Omdat ook bodem reflecties optreden is hier 3 dB van afgetrokken, waardoor de waarschijnlijke bronsterkte 15 dB hoger is dan de gemeten waarden. Dit is een puur indicatief getal, omdat de daadwerkelijke afstand tot de bron niet gemeten is (daarvoor is een 3D meter nodig).

De meting wordt ook beïnvloed als meerdere bronnen tegelijk aanwezig zijn. Dan vindt optelling plaats, hiervoor is niet gecorrigeerd. Uit de teruggekeken beelden bleek overigens dit maar zeer beperkt op te treden.

Verband tussen de gemeten LAeq,1s en LAFmax waarden

De piekwaarden in dit document zijn gebaseerd op de LAeq,1s waarden die boven de 80 dB(A) zijn geconstateerd. In de normen worden piekwaarden vaker uitgedrukt in LAFmax. Dat is het maximale A gewogen geluidniveau met de tijd-weging FAST. De LAeq,1s is het gemiddelde geluid in één seconde. De LAFmax is altijd hoger dan de LAeq,1s. Hoeveel hoger hangt af van het brongeluid en de tijdsduur van de piek. Omdat het voor referentie handig is om ook de LAFmax te kennen (die zijn overigens van alle metingen bekend en beschikbaar in het Munisense meetplatform), is onderstaande grafiek toegevoegd die per brongeluid het geconstateerde verschil tussen de LAeq,1s en de LAFmax aangeeft.



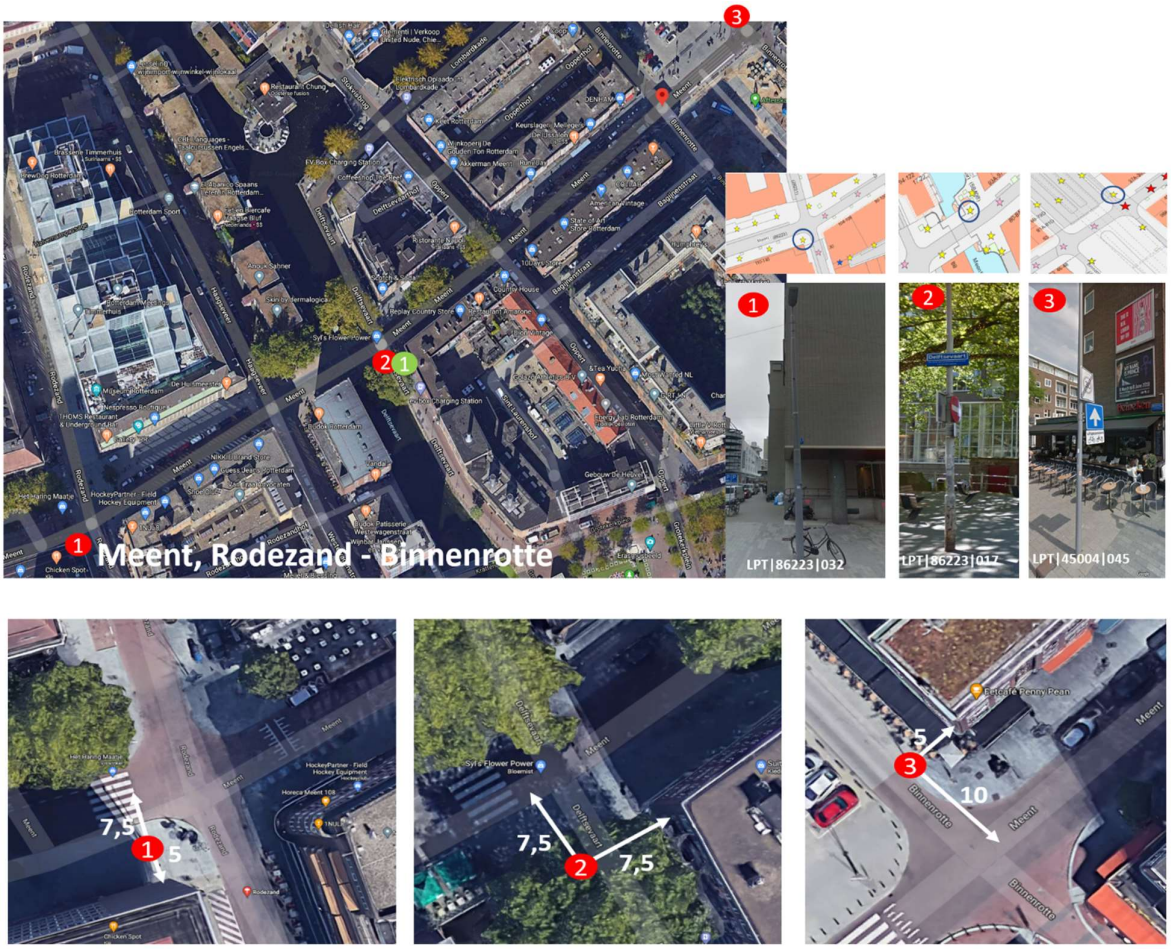
Figuur 23: Gemeten relatie tussen LAeq,1s en LAmax bij de verschillende bronnen

De bovenstaande grafiek kan als volgt worden gelezen. Voor auto's is in 25% van de metingen de LAmax 2 dB, voor 25% 3 dB, voor 20% 4 dB en voor 15% 5 dB hoger. Hoge verschillen ontstaan door de knallen in de uitlaat. Bij motoren ligt de verdeling er iets onder. Bromfietsen zijn 1 tot 2 dB hoger en hebben minder spreiding. Bij claxons is de spreiding het grootst tussen 2 en 6 dB. Een kort claxon signaal levert een groot verschil tussen de LAeq,1s en LAFmax op.

Details meetposities

Onderstaande beelden geven inzicht in gebruikte meet posities en afstanden tot de bron.

Meent



Figuur 24: Meetpositie aan de Meent

West-Kruiskade

Figuur 25: Meetpositie aan de West-Kruiskade

Nieuwe Binnenweg

Figuur 26: Meetpositie aan de Nieuwe Binnenweg

Bijlage 4: Gebruikte monitoringstations

Voor de geluid monitoring is gebruik gemaakt van de munisense NP monitoring stations.

Deze NP monitoring stations, ondersteunen naast alle IEC 60651/60804/61672 eigenschappen ook geavanceerde geluidsherkenning. Via het portaal worden geluiden in de leefomgeving geïdentificeerd (niveau, tijdstip, geluidsbron en locatie). Veel voorkomende geluiden in de leefomgeving worden dan automatisch herkend. Onbekende geluiden kunnen met ondersteuning van uitluisteren worden geïdentificeerd en toegevoegd aan de database, zodat deze daarna automatisch worden herkend. De monitoring stations meten alle relevante geluidsniveaus en spectrale informatie, en verzenden dit in real-time.

(https://munisense.com/assets/general/documents/leaflet_noise_noisemeters_NPseries.pdf).

De monitoring stations zijn ook uitvoerbaar met 4 microfoons, waarmee de locatie van het brongeluid kan worden bepaald. Twee monitoring stations waren gekoppeld met een AXIS 180 graden camera voor registratie van het videosignaal.

De stations zijn voor plaatsing en bij ophalen gekalibreerd. Hierbij zijn geen afwijkingen aangetroffen.