

DUURZAAM STILLER

OVER VERKEERSLAWAAI EN
GELUIDSARME BETONWEGEN

INFRASTRUCTUUR | OKTOBER 2014

(94) f2 (P3)
BB/SfB

- GELUID EN VERKEERSLAWAAI
- GELUIDSARME WEGDEKKEN
- STILLERE BETONWEGEN IN BELGIE EN IN HET BUITENLAND





Beperking van het verkeerslawaaï is een alsmear belangrijker thema geworden in de voorbije decennia. De Europese Unie heeft het algemeen probleem van omgevingslawaaï aangepakt in een Europese Richtlijn van 2002, de zogenoemde “Environmental Noise Directive (END)”. De lidstaten kregen de opdracht geluidskaarten op te stellen en acties te ondernemen om de schadelijke effecten van het geluid te voorkomen en te reduceren met de focus op lawaaï van drukke autowegen en spoorwegen, in dichtbevolkte gebieden en nabij gevoelige sites zoals ziekenhuizen of scholen.

Ook in België werd de END door de verschillende gewesten tot uitvoering gebracht en diverse acties werden al ondernomen waaronder de installatie van geluidsschermen op verschillende plaatsen langs autosnelwegen.

Voor verkeerslawaaï is het echter efficiënter om het probleem aan de bron aan te pakken door het toepassen van geluidsarme wegdekken. Daarom is en blijft de ontwikkeling van alternatieve types van verhardingen en oppervlakafwerkingen een actueel onderwerp. Het doel is de vermindering van het rolgeluid dat ontstaat door de interactie tussen band en wegdek en de voornaamste oorzaak is van verkeersgeluid. Hierbij is het ook van belang dat andere essentiële kenmerken van de wegstructuur en het oppervlak gevrijwaard blijven. We denken hierbij aan de vlakheid en stroefheid van het wegdek maar ook aan de duurzaamheid ervan. Tot slot is het belangrijk dat een stil wegdek dat ook zo lang mogelijk blijft. Duurzaam stiller is dus het doel.



Voorbeelden van geluidsschermen langsheen de E17 en E313

GELUID OF LAWAAI ?

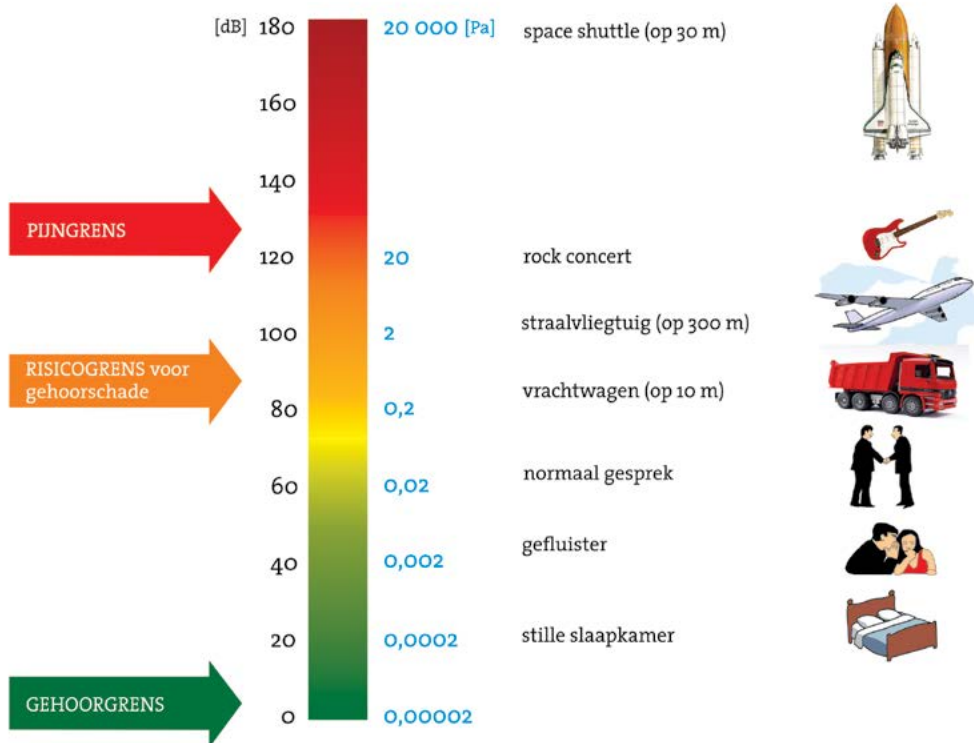
Geluid kunnen we overal rondom ons waarnemen : je lievelingsliedje op de radio, een huilende baby, spelende kinderen, een grasmaaier of golven op het strand. Lawaai is geluid dat we hinderlijk vinden. Dit is subjectief en verschilt dus van persoon tot persoon.

WAT IS GELUID ?

Technisch gesproken bestaat geluid uit kleine en snelle cyclische veranderingen van de luchtdruk. Ons gehoorsysteem kan deze drukveranderingen waarnemen en zet ze om tot het geluid dat we horen. Dit gebeurt echter niet lineair maar volgens een logaritmische schaal. Een drukverschil tussen 0,1 Pa (Pascal-eenheid van druk) en 1 Pa – een verschil dus van 0,9 Pa – wordt ongeveer hetzelfde waargenomen als een drukverschil tussen 1 Pa en 10 Pa – een verschil dus van 9 Pa. Daarom wordt een geluidsniveau uitgedrukt in decibel volgens volgende formule :

Onderstaande figuur stelt de omzetting van drukverschillen naar geluidsniveaus voor met bijhorende tekeningen die helpen om de verschillende niveaus beter te begrijpen. Bovendien horen we geluid in verschillende frequenties in een bereik van 20 tot 20.000 Hz (Herz). Omdat we niet alle toonhoogten op dezelfde manier kunnen waarnemen, worden geluidsniveaus meestal gefilterd. Voor verkeerslawaai gebruikt men de A-filter, waarbij het meeste belang gaat naar frequenties tussen 1000 en 4000 Hz, voor dewelke mensen het meest gevoelig zijn. We spreken dan van « A-gewogen decibels » of dB(A).

$$\text{Geluidsniveau (dB)} = 20 \log (\text{geluidsdruk (Pa)} / 0,00002 \text{ Pa})$$



Vergelijking van geluidsdruk, geluidsniveau en voorbeelden van overeenstemmende geluidsbronnen

De volgende vuistregels kunnen ook van pas komen. Een verandering van 1 tot 3 dB wordt door de meesten als 'net hoorbaar' beschouwd; een verandering van 5 dB geeft volledig uitsluitel. Dit is vooral zo als er enige tijd is tussen het waarnemen van de te vergelijken geluiden. Voor de meeste mensen betekent een verschil van 10 dB een 'verdubbeling' (of 'halvering') van het geluid. Belangrijk om weten voor deze vuistregels is dat ze alleen geldig zijn voor hetzelfde type geluid. Als het type geluid verandert, verandert ook de perceptie van de geluidsverschillen.

VERKEERSLAWAAI

Voor het geluid dat door het verkeer gegenereerd wordt, spreekt men meestal van « verkeerslawaaai ». Het omvat het geluid afkomstig van verschillende types bronnen, meestal onderverdeeld in :

- aandrijving: motor, uitlaat en alle andere componenten van het aandrijvingsmechanisme;
- interactie band-wegdek : het zogenoemde rolgeluid;
- aerodynamisch geluid : veroorzaakt door de windturbulenties rondom het voertuig.

Het soort voertuig en de snelheid spelen een belangrijke rol. Voor personenvoertuigen wordt het rolgeluid dominant t.o.v. het aandrijvingsgeluid vanaf een snelheid van ca. 30 à 40 km/u. Voor vrachtwagens is dat pas vanaf ca. 50 km/u omwille van het grotere aandeel van het motorgeluid. Aerodynamisch geluid wordt maar belangrijk bij zeer hoge snelheden.

Een verlaging van de snelheid voor personenwagens van 120 km/u naar 90 km/u maar met behoud van een snelheid voor vrachtwagens van 90 km/u resulteert ongeveer in een verlaging van het verkeerslawaaai met 1 dB(A). Uiteraard speelt ook het verkeersvolume een rol, maar minder dan men zou denken : voor eenzelfde snelheid en samenstelling van het verkeer zal een verdubbeling van het volume aanleiding geven tot een fysische verhoging van 3 dB(A).

INTERACTIE BAND-WEGDEK

Zowel het type band als het wegdek spelen uiteraard een rol in hun onderlinge interactie. We mogen niet vergeten dat beide niet alleen ontworpen worden met het oog op een laag rolgeluid maar in de eerste plaats voor een goede verkeersveiligheid en een gunstige verhouding kostprijs/levensduur. Verschillende mechanismen liggen aan de basis van het rolgeluid dat ontstaat door de interactie van de banden van het voertuig met het wegdek (hamereffect, pompeffect, kleven-glijden-loskomen van het rubber). Bovendien wordt het geluid nog versterkt door het hoorneffect, trillingen en resonantieverschijnselen.

HOE WORDT VERKEERSLAWAAI GEMETEN ?

Zie foto's op volgende pagina. In Europa wordt meestal gebruik gemaakt van de SPB-methode of de CPX-methode.

Bij de Statistical Pass By-methode (SPB, ISO 11819-1) wordt aan de kant van de weg het verkeerslawaaai gemeten van een grote hoeveelheid passerende voertuigen waarbij onderscheid kan gemaakt worden tussen personenwagens en vrachtwagens (foto 2).

Met de Close Proximity-methode (CPX, ISO/CD 11819-2) wordt voornamelijk het rolgeluid gemeten met een microfoon die geïnstalleerd wordt vlak bij een testband. Meestal worden de banden gemonteerd op een akoestisch geïsoleerde aanhangwagen. Het type testband dat gebruikt wordt speelt uiteraard een belangrijke rol in het resultaat.

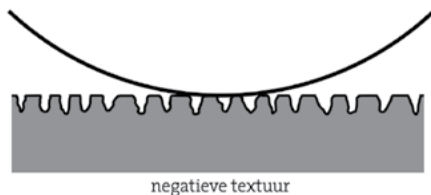
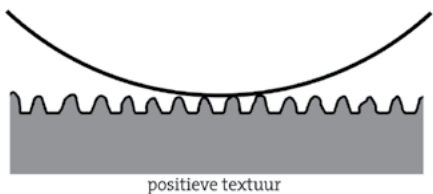
In Amerika gebruikt men vaak de OBSI-methode (On Board Sound Intensity) die enigszins vergelijkbaar is met de CPX. In plaats van geluidsdrukken wordt echter geluidsintensiteit gemeten met twee microfoons waardoor beter het rolgeluid afzonderlijk kan gemeten worden.

BASISREGELS VOOR EEN GELUIDSARM WEGDEK

Volgende factoren beïnvloeden het rolgeluid :

- een goede vlakheid van de weg met afwezigheid van megatextuur (geen golvingen of oneffenheden);
- een homogene maar niet periodieke verdeling van kleine stenen (tot 10mm) aan het oppervlak. Tussen de steentjes kan de lucht ontsnappen. Opgelet : een glad oppervlak is niet geluidsarm.
- beter een negatieve textuur dan een positieve (zie figuur);
- porositeit : een maximaal gehalte aan holle ruimten (tot 20% of meer), wat de absorptie van geluid toelaat, in zoverre de duurzaamheid gegarandeerd blijft;
- beperkte stijfheid van de verharding.

Bij de optimalisatie van een geluidsarm wegdek dient, indien mogelijk, op verschillende factoren tegelijk worden ingespeeld. Daarenboven mogen er geen grote toegevingen gebeuren op vlak van duurzaamheid van de weg



Het soort voertuig, de snelheid en de interactie band-wegdek zijn belangrijke factoren m.b.t. lawaaiproductie



SPB - Statistical Pass By



CPX - Close Proximity



OBSI - On Board Sound Intensity



Dwarsgegroefd beton



Grof uitgewassen beton 0/40 of 0/32,
boven op basis van porfiersteenslag,
onder op basis van gebroken grind

BETONWEGEN UIT HET VERLEDEN

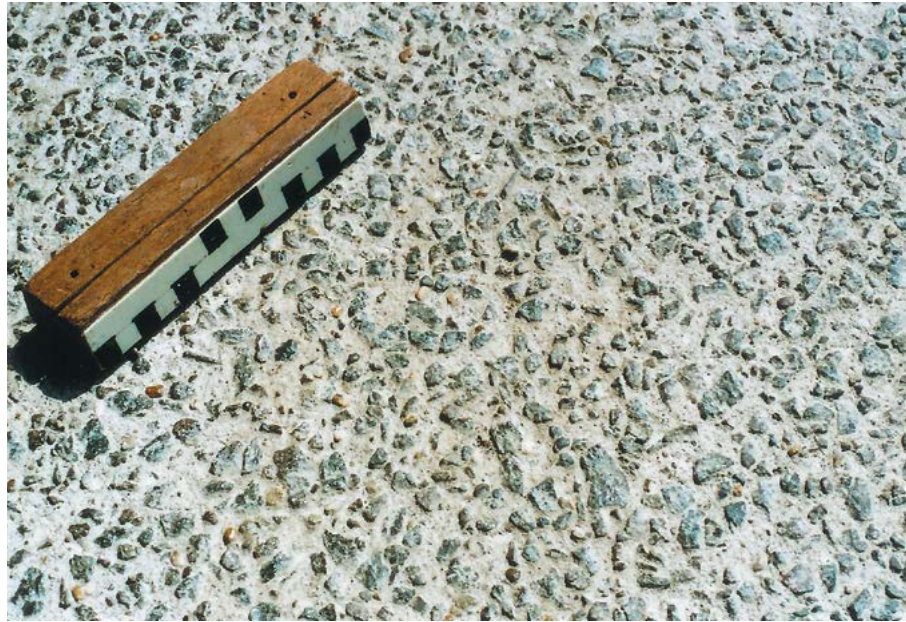
In de jaren 1970 werd een belangrijk deel van het Belgisch autosnelwegennetwerk aangelegd in doorgaand gewapend beton. De oppervlakafwerking bestond uit dwarsgroeven in het verse beton. Dit resulteerde in een stroef en veilig wegdek met een goede zijdelingse waterafvoer. Op vlak van rolgeluid, dat in die tijd nog geen belangrijke rol speelde, scoort deze afwerking echter zeer slecht. Het geluidsniveau ligt zeer hoog (103 à 104 dB(A) gemeten met CPX aan 80 km/u) en bovendien zijn er hoge toonpieken waarneembaar die zeer storend zijn voor de omwonenden.

Dit type oppervlak wordt dan ook niet meer toegepast op onze wegen en de bestaande wegdekken worden vaak overlaagd met een splitmastiëkasfalt of een dunne bitumineuze toplaag.

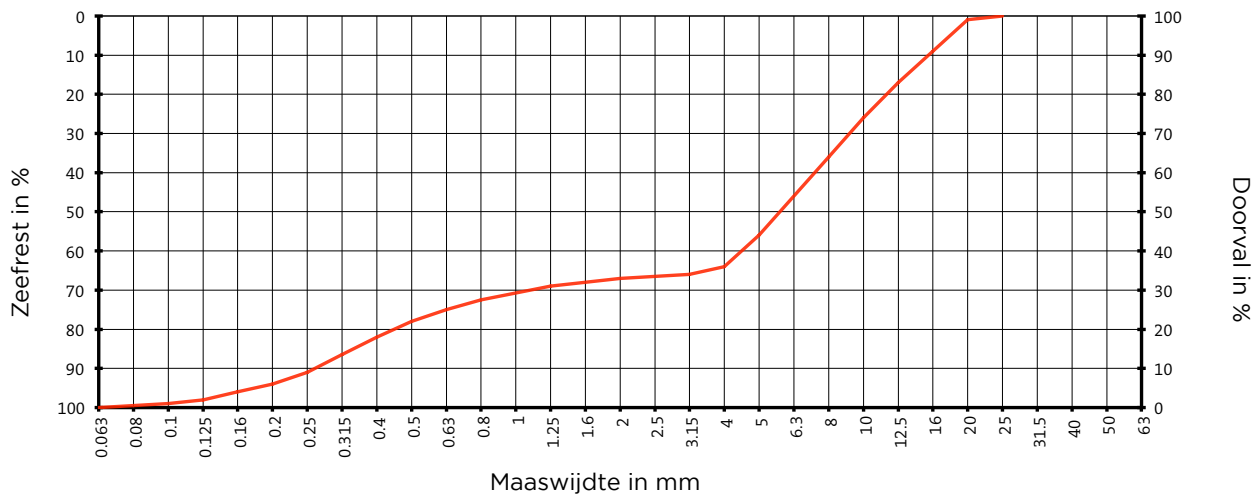
Eind jaren 1970 werd in België het chemisch uitwassen van het betonoppervlak ingevoerd. Er werd vooral een goede stroefheid beoogd maar rolgeluid was nog geen criterium. De betonsamenstelling bestond uit grote granulaten (32 tot 40 mm) die aan het oppervlak werden blootgelegd. Ook dit zijn zeer lawaaierige wegdekken; de hoge piektonen zijn hier wel niet meer aanwezig.

DE EVOLUTIE NAAR STILLER BETON

Een eerste stap in de verbetering van het uitgewassen beton was de reductie van de maximum korrelgrootte van 31,5 naar 20 mm. Bovendien werd het aandeel van fijnsteentjes van 4 tot 6,3 mm (of 8 mm), verhoogd tot minimaal 20% (of 25%) van het mengsel van zand en steenslag. Op die manier zakken de grote en stijgen de fijnere stenen tijdens het trillen van het beton. De fijne steentjes komen na uitwassen aan het oppervlak te liggen en vormen de geschikte macrotextuur voor een geluidsarm betonnen wegdek. Dezelfde techniek kan ook toegepast worden voor een maximum korrelgrootte van 14 mm.



Textuur van een uitgewassen beton o/14 (Brussel, Lorrainedreef, 2003)

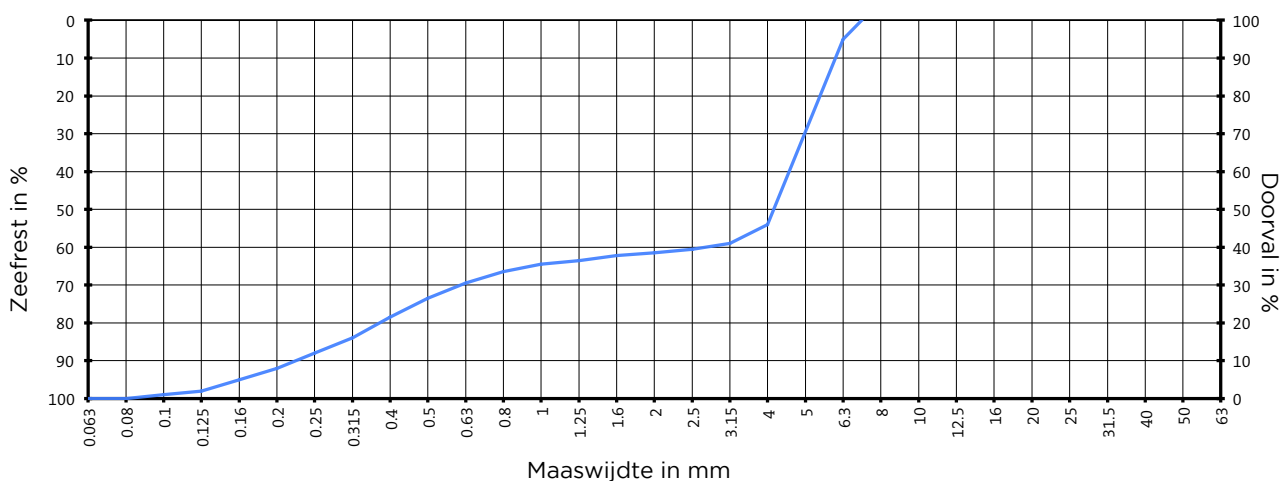


Korrelverdelingskromme voor een beton o/20 voor eenlaagse uitgewassen betonverharding



Textuur van een uitgewassen beton
o/6,3 (Zwijndrecht, N49, 2007)

Een andere oplossing is het gebruik van een tweelaagse betonverharding. De onderlaag (15 à 20 cm dik) kan grovere stenen bevatten tot 31,5 mm terwijl voor de toplaag (5 cm dik) alleen duurzame polijstbestendige steentjes van kaliber 4/6,3 mm gebruikt worden. Aangezien er uitsluitend kleine granulaten in het mengsel van de toplaag zijn, zullen deze ook dichtgepakt aan het oppervlak verschijnen na verdichten en uitwassen van het beton.



Korrelverdelingskromme voor een beton o/6,3 voor een toplaag van een tweelaagse betonverharding



Textuur van een zeer open beton
(Herne, N255, 1996)

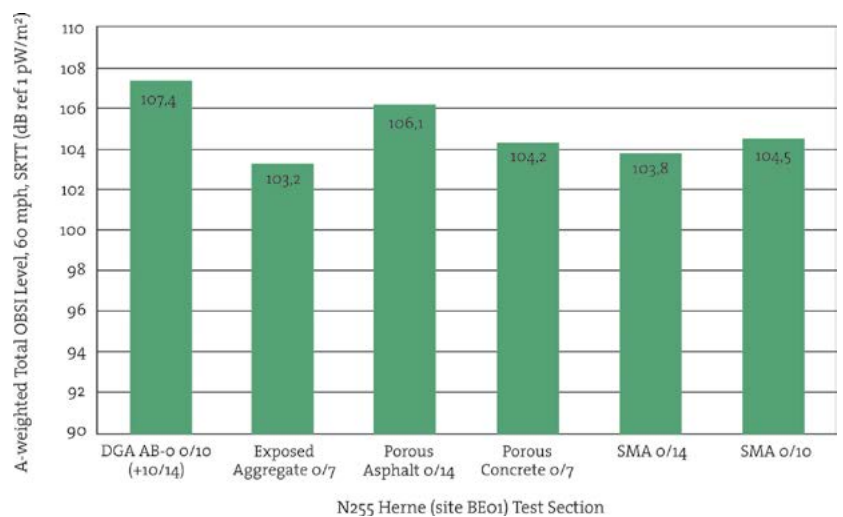
Ook poreus (of zeer open) beton is mogelijk. Door de zandfractie weg te laten in de samenstelling ontstaan er toegankelijke holtes tussen de granulaten. Om een betere hechting tussen de stenen te bekomen kunnen polymeren worden toegevoegd. Zeer open beton is vergelijkbaar met zeer open asfalt : er zijn grote geluidsreducties mogelijk en het spatwater wordt geëlimineerd. Maar ook de nadelen zijn er : er is risico op verstopping en het oppervlak is gevoelig voor rafeling (loskomen van steentjes).

CASE STUDY 'HERNE'

In 1996 werd in Herne op de gewestweg N255 een reeks proefvakken geluidsarme wegdekken aangelegd. Op een 18 cm dikke onderlaag van doorgaand gewapend beton werden verschillende toplagen aangebracht van fijn uitgewassen beton, poreus beton, dicht asfaltbeton, splitmastiekasfalt en zeer open asfalt. Deze testsecties werden onderworpen aan tal van metingen en evaluaties, onmiddellijk na aanleg en na drie jaar (1999). Zowel voor het zeer open asfalt als voor het zeer open beton, die aanvankelijk het best scoorden, werd een geluidstoename waargenomen van 2,5 dB(A). Na drie jaar hadden het dicht asfalt en het fijn beton de laagste geluidsniveaus.

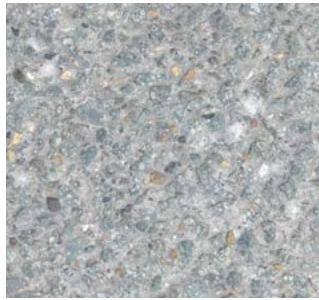
In oktober 2007, dus 11 jaar na aanleg, werd een nieuwe reeks metingen uitgevoerd door een Amerikaans team met de OBSI-methode. De resultaten zijn voorgesteld in onderstaande figuur. Door degradatie van het dicht asfaltbeton had dit de hoogste geluidsproductie. De andere oppervlakken volgden de trend van 1999.

De algemene conclusie na 18 jaar dienst is dat de toplaag in fijn uitgewassen beton het best heeft gepresteerd op lange termijn, dit op vlak van rolgeluid en duurzaamheid. In 2010 werden overigens alle proefvakken, met uitzondering van het fijn uitgewassen beton, vernieuwd met een bitumineuze toplaag. Het vak in fijn uitgewassen beton is met een levensduur van bijna 20 jaar dienst nog in onberispelijke staat en getuigt zo van de beste keuze voor een stille en duurzame oplossing.



CASE STUDY 'ESTAIMPUIS'

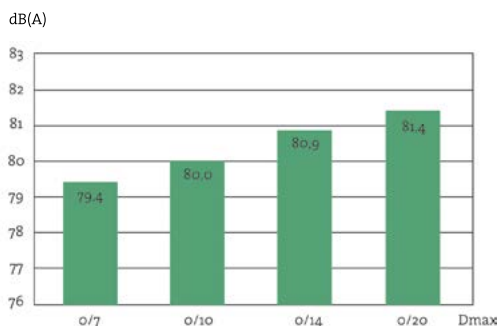
Nr. proefvak	Onderlaag		Toplaag	
	Dikte	Dmax (in mm)	Dikte	Dmax (in mm)
1	15 cm	32	5 cm	7
2	14 cm	32	6 cm	10
3	12 cm	32	8 cm	14
4	12 cm	32	8 cm	20



Estaimpuis : aanleg van het tweelaags doorgaand gewapend beton

	Maximale waarde	Proefvak 1 0/7	Proefvak 2 0/10	Proefvak 3 0/14	Proefvak 4 0/20
Gemiddelde VC (2,5 m)	30	15.15	16.2	14.7	17.05
Gemiddelde VC (10 m)	70	33.3	31.4	28.95	41.05

Resultaten vlakheidsmetingen



dB(A) = gemiddelde van de maximale geluidsniveaus gemeten met de SPB-methode

Invloed van granulometrie op rolgeluid (90 km/u)

Op de N511 in Estaimpuis tussen Dottignies (Moeskroen) en Wattrelos (FR) werd in 2002 een wegvak vernieuwd over een afstand van 1250 m. Hiervan werd gebruik gemaakt om vier proefvakken in tweelaags doorgaand gewapend beton te realiseren. De totale dikte bedroeg 20 cm maar de dikte en de grootste korrelmaat van de toplaag varieerden per proefvak – zie tabel hiernaast.

Op het einde der werken werden metingen uitgevoerd van stroefheid, vlakheid en geluid. Aan de eisen van stroefheid werd gemakkelijk voldaan : de dwarswrijvingscoëfficiënt gemeten met de odolograaf bevond zich steeds tussen 60 en 70, ruim boven de vereiste waarde van 50.

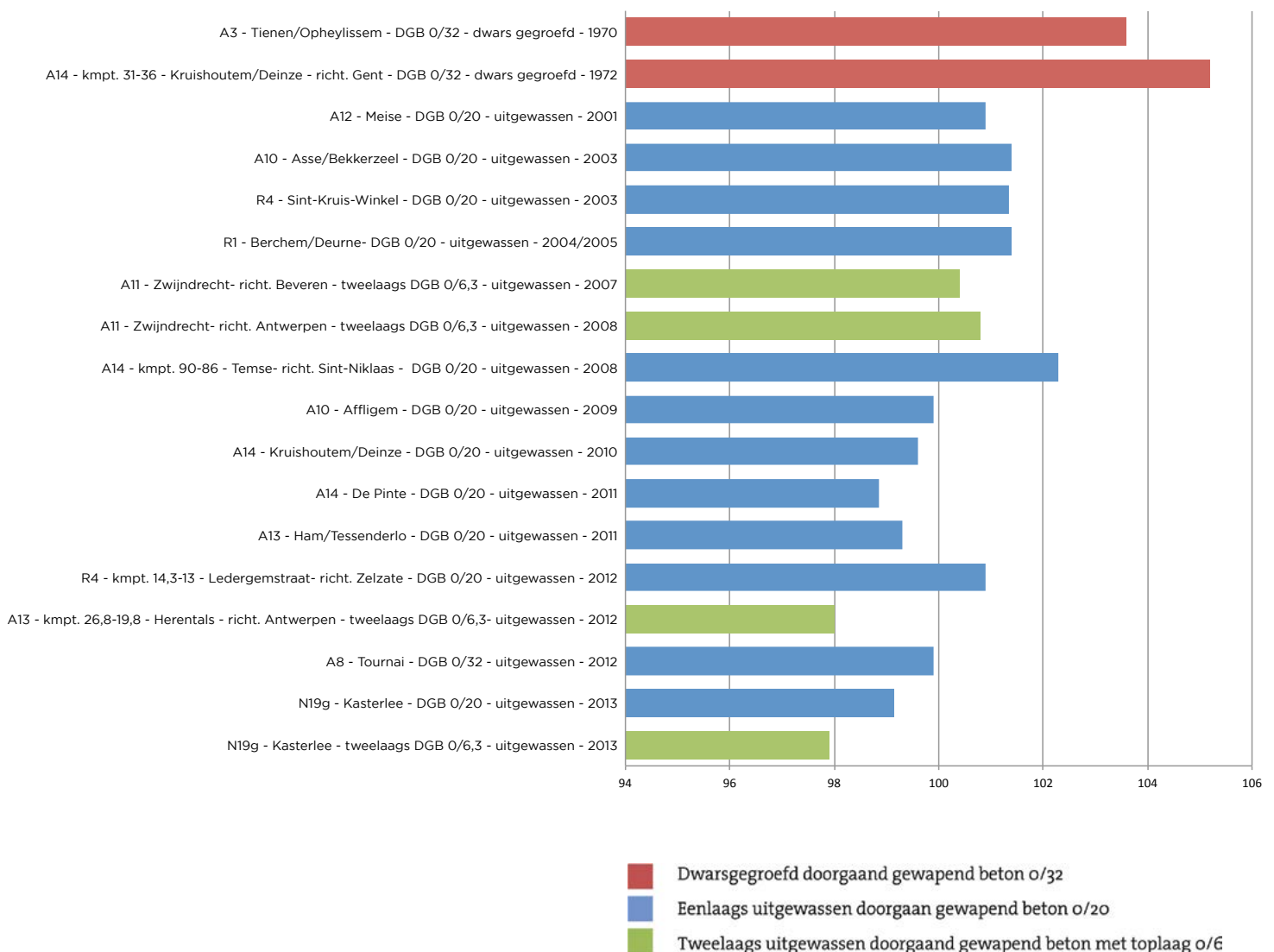
Opvallend waren ook de bijzonder goede resultaten voor de vlakheid. In onderstaande tabel staan de resultaten van de vlakheidscoëfficiënt, gemeten met de APL (Analyseur de profil en long), die ongeveer de helft bedragen van de maximaal toegestane waarden. Tweelaagse betonverhardingen zijn doorgaans zeer vlak omdat de glijbekistingmachine voor de toplaag een kleinere massa beton dient te verdichten en nivelleren.

Geluidsmetingen werden uitgevoerd met de SPB-methode bij snelheden van 70 en 90 km/u. Het diagram hiernaast geeft de resultaten voor de verschillende vakken voor 90 km/u. Zoals verwacht neemt het verkeersgeluid af bij afnemende grootste korrelafmeting van het beton van de toplaag, met een winst van 2 dB tussen de grootste (20 mm) en de kleinste (7 mm) korrelmaat.

De resultaten van stroefheid en vlakheid tonen aan dat deze weg een hoog niveau van veiligheid en rijcomfort biedt. De goede resultaten op vlak van geluid zijn verbonden aan de keuze van korrelmaat voor de deklaag maar worden zeker ook positief beïnvloed door de vlakheid van het doorgaand gewapend beton.

DE HUIDIGE STAND VAN ZAKEN IN BELGIE

In 2011 heeft het Agentschap Wegen en Verkeer van de Vlaamse Overheid een CPX-aanhangwagen aangekocht met het oog op een systematische uitvoering van geluidsmetingen op gewestwegen en autosnelwegen. Ook in Wallonië werden al metingen uitgevoerd op nieuw aangelegde wegvakken. Onderstaand diagram geeft een overzicht van de resultaten van een reeks metingen op betonwegen (CPX met SRTT-band voor personenwagens bij 80 km/u in dB(A); metingen uitgevoerd in 2011-2012 en in 2013 voor de N19g Kasterlee).





E17 De Pinte – Kruishoutem : eenlaags
uitgewassen beton 0/20
Gemeten geluidsniveaus met CPX aan 80 km/u:
98,5 dB(A) voor vrachtwagenband en
99,1 dB(A) voor personenwagenband



E313 Herentals-Grobbendonk : tweelaags
uitgewassen beton met deklaag 0/6,3
Gemeten geluidsniveaus met CPX aan 80 km/u:
98,5 dB(A) voor vrachtwagenband en
98,5 dB(A) voor personenwagenband



Het fijn uitgewassen beton in eenlaagse of tweelaagse uitvoering is de standaard oppervlakafwerking voor betonnen autosnelwegen en gewestwegen in België. Door een verdere optimalisatie van de samenstelling (hoog gehalte aan fijne steentjes) en betere uitvoeringstechniek (moderne glijbekistingmachines) is men erin geslaagd om het rolgeluid van de eenlaagse oplossing nog verder te doen dalen tot ongeveer 99 dB(A), wat al vergelijkbaar is met een steenmastiekasfalt met steentjes van 10 mm (SMA-C).

Met de tweelaagse uitvoering daalt het geluidsniveau nog verder met 0,5 à 1 dB(A).

Gedurende de eerste jaren wordt er een lichte verhoging (ca. 1,5 dB) van het rolgeluidsniveau vastgesteld. Nadien stabiliseert dit zich, zoals merkbaar in het diagram voor de betonverhardingen van meer dan 10 jaar oud (A12 te Meise; A10 te Assen; R4 te Gent).

VERGELIJKING MET HET BUITENLAND

In Oostenrijk werd het fijn uitgewassen beton geoptimaliseerd als deklaag van een tweelaags platenbeton. De eerste toepassingen op autosnelwegen dateren al van 1990. Een belangrijk deel van hun autosnelwegennet werd sindsdien op die bouwwijze uitgevoerd.

In Duitsland werd gedurende vele jaren het oppervlak van betonnen autowegen afgewerkt met een gesleepte juten doek. Dit levert een zeer ondiepe textuur op die performant is op vlak van rolgeluid maar problemen kan opleveren qua stroefheid. Daarom werd sinds enkele jaren ook de techniek van het tweelaags uitgewassen beton overgenomen.



Twee glijbekistingmachines die een tweelaags platenbeton aanleggen op de A1, nabij Wenen.

Duitse autosnelweg aangelegd in tweelaags platenbeton met fijn uitgewassen beton als oppervlakafwerking.





Langs fijngroeven van het verse beton in Illinois, U.S.



Diamond grinding te Lubbeek



“NGCS”

In de Verenigde Staten worden nog andere afwerkingstechnieken gebruikt. In vele staten worden fijne langsgroeven in het verse beton aangebracht met een kam. Ook dit geeft goede resultaten op vlak van geluid en stroefheid, op voorwaarde dat de uitvoering zorgvuldig gebeurt.

Ook het langse fijngroeven van het verharde beton, het zogenoemde “**diamond grinding**” wordt er vaak toegepast. Deze techniek is ook in ons land al frequent toegepast voor de restauratie van oude betonoppervlakken. Hiermee kunnen rolgeluidsniveaus behaald worden die nog lager liggen dan voor uitgewassen beton.

In de U.S heeft de International Grooving and Grinding Association (IGGA) het proces van langsgroeven en diamantslijpen nog verder geoptimaliseerd met het zogenoemde “Next Generation Concrete Surface (NGCS)”. Een negatieve textuur van langsgroeven wordt gecombineerd met fijne groefjes op de bovenvlakken. Dit wordt omschreven als het geluidsarmste niet-poreuse betonoppervlak. Ook in België wordt een proefvak gepland om de prestaties van deze techniek op een oud betonoppervlak te evalueren.

BESLUITEN

- Waar er vroeger weinig of geen aandacht was voor geluid en verkeerslawaaai in het bijzonder, is het vandaag een belangrijk criterium geworden bij het ontwerpen en de aanleg van wegeninfrastructuur.
- In het kader van de Europese Richtlijn over omgevingslawaaai worden diverse maatregelen genomen om o.a. het verkeerslawaaai aan te pakken, met name de bouw van geluidsschermen en de aanleg van geluidsarme wegooppervlakken.
- Op vlak van afwerking en textuur hebben de betonoppervlakken in België een evolutie ondergaan in de voorbije 50 jaar. Dwarsgegroefde oppervlakken worden niet meer toegepast op autosnelwegen en gewestwegen. Een geborstelde afwerking is nog steeds een goed compromis in geval van lage snelheden (≤ 70 km/u). De standaard oppervlakafwerking is het fijn uitgewassen beton, hetzij in eenlaagse, hetzij in tweelaagse uitvoering.
- De betonsamenstelling speelt een cruciale rol voor het bekomen van een homogeen en geluidsarm uitgewassen beton. Ook het vakmanschap tijdens de uitvoering is van belang om een effen en comfortabel wegdek te bekomen. De vlakheid draagt tevens bij tot de beperking van het rolgeluid.
- Moderne wegdekken in doorgaand gewapend beton met een fijn uitgewassen oppervlak zijn op vlak van rolgeluid competitief met de actuele gesloten bitumineuze wegdekken met fijn steenslagkaliber. De duurzaamheid van het geluidsniveau is bovendien een meerwaarde voor betonverhardingen.
- Verdere metingen en onderzoek kunnen leiden tot nog betere inzichten en tot een verdere optimalisering van de geluidsarme wegdekken.
- Tot slot mag men niet vergeten dat geluid niet het enige ontwerpcriterium is. De relevantie ervan dient bepaald te worden in functie van de context en omgevingsvoorwaarden. Veiligheid en de daaraan gelinkte eigenschap van stroefheid blijven steeds de prioriteit. Om de juiste keuze van wegdek te kunnen maken is een globale evaluatie noodzakelijk van de duurzaamheid, de kostprijs en de oppervlakkenmerken.

Geluidsarm tweelaags beton in combinatie met geluidswanden op de N19g Geel-Kasterlee, nieuwe noord-zuidverbinding in de Kempen





Dit bulletin is een publicatie van :
FEBELCEM
Federatie van de Belgische Cementnijverheid
Vorstlaan 68 - 1170 Brussel
tel. 02 645 52 11 - fax 02 640 06 70
www.febelcem.be
info@febelcem.be

Auteur :
ir. L. Rens

Wettelijk depot :
D/2014/0280/05

V.u. : A. Jasienski

infobeton.be

BIBLIOGRAFIE

CAESTECKER C. (AWV)

Test sections of noiseless cement concrete pavements. Conclusions
Vilvoorde, Belgium, 1999

DEBROUX R. ; DUMONT R.

Twin-layer continuously reinforced concrete pavement on the N511 at Estaimpuijs (Belgium): an investigation of the optimization of surface characteristics
Paper at the 8th International Conference on Concrete Pavements, Colorado Springs, Colorado, U.S.A., August 2005

RASMUSSEN R.O. ; BERNHARD R.J. ; SANDBERG U. ; MUN E.P.

The little book of quieter pavements.
The Transtec Group, Report n° FHWA-IF-08-004, July 2007

RASMUSSEN R.O. (THE TRANSTEC GROUP) ; FERRAGUT T.R. (TDC PARTNERS) ; WIEGAND P.D. (NATIONAL CONCRETE PAVEMENT TECHNOLOGY CENTER)

Comparative measurements of tire/pavement noise in Europe and the United States NITE II. Paper at the 37th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Shanghai, China, October 2008

BRIESSINCK M. (AWV) ; RENS L. (FEBELCEM)

Oppervlakkenmerken van hedendaagse betonverhardingen
Bijdrage voor het Belgisch Wegencongres te Gent, september 2009

M. HAIDER M. (AUSTRIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY)

Investigation and classification of low-noise concrete roads
Vienna, Austria
Paper at the 11th International Symposium on Concrete Roads,
Seville, Spain, September 2010

SCOFIELD L. (ACPA)

Development and implementation of the Next Generation Concrete Surface
Final Report, March 2011

Met dank aan AWV, Afdeling Wegenbouwkunde voor het ter beschikking stellen van de meetresultaten.