



VISOKA ŠOLA ZA TRAJNOSTNI RAZVOJ

VISOKA ŠOLA ZA TRAJNOSTNI RAZVOJ

Diplomsko delo visokošolskega strokovnega študija
Program: Varstvo okolja

UPORABA NIZKOHRUPNIH ASFALTOV PRI VARSTVU OKOLJA

Mentor: Nikola Holeček, izr. prof. dr.

Kandidat: Igor Jaušovec

Somentor: Zvonimir Britovšek, univ. dipl. fizik

Lektorica: Bernarda Frass, učiteljica slov. jezika s književnostjo, svetnica

Ljubljana, marec 2024

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju Nikoli Holečku, izr. prof. dr., za njegovo neprecenljivo strokovno pomoč pri izdelavi diplomskega dela.

Zahvala tudi somentorju Zvonimirju Britovšku, univ. dipl. fiziku, nekdanjemu sodelavcu v podjetju DRI, družbi za upravljanje investicij, d. o. o., za strokovno pomoč in usmerjanje pri nastajanju diplomskega dela.

Prav tako se zahvaljujem lektorici Bernardi Frass za jezikovni pregled.

Hvaležnost izrekam tudi družinskim članom, ki so me v času študija podpirali in skrbeli, da je bilo doma vse postorjeno. Brez njihove podpore bi težko dosegel ta cilj.

IZJAVA

Študent Igor Jaušovec izjavljam, da sem avtor tega diplomskega dela, ki sem ga napisal pod mentorstvom Nikole Holečka,izr. prof. dr. in somentorja Zvonimirja Britovška, univ. dipl. fizika.

Skladno s 1. odstavkom 21. člena Zakona o avtorski in sorodnih pravicah dovoljujem objavo tega diplomskega dela na spletni strani šole.

Dne 20. 3. 2024

Podpis:

POVZETEK

Vsak hrup v okolju je nezaželen ali celo škodljiv zvok, ki ga povzročajo človeške dejavnosti na prostem, vključno s hrupom cestnega prometa. Zvočno onesnaževanje kot posledica vse številčnejšega prometa vpliva na zdravje ljudi in kot tako postaja pereče okoljsko vprašanje. Z zmanjšanjem emisij prometnega hrupa izboljšamo razmere v naravnem in življenjskem okolju. Hrup na vozišču generira premikajoča se pnevmatika na pospešenem prosto kotalečem se kolesu v medsebojni interakciji z vozno površino. V diplomski nalogi je opredeljena najučinkovitejša rešitev zmanjšanja prometnega hrupa pri njegovem izvoru. Poznamo asfaltne zmesi, ki uspešno zmanjšujejo emisije hrupa v okolico. Cilj naloge je prikazati potrebo po širši uporabi nizkohrupnih asfaltov. Rezultati iz poskusnih polj kažejo, da lahko učinke zmanjševanja hrupa izboljšamo z vmešavanjem gumiranih dodatkov iz recikliranih pnevmatik vozil. Takšna ponovna uporaba odpadnih pnevmatik predstavlja tudi dobro osnovo za okoljsko trajnostno proizvodnjo.

KLJUČNE BESEDE

- zvočno onesnaževanje,
- prometni hrup,
- nizkohrupni asfalti,
- asfalti z dodatkom gume,
- trajnost.

ABSTRACT

Any environmental noise is unwanted or even harmful sound produced by human activities outdoors, including road traffic noise. Noise pollution as a result of more and more traffic affects people's health and thus becomes a pressing environmental issue. By reducing traffic noise emissions, we improve conditions in the natural and living environment. Road noise is generated by a moving tire on an accelerated free-rolling wheel interacting with the road surface. The thesis defines the most effective solution for reducing traffic noise at its source. We know asphalt mixtures that successfully reduce noise emissions into the surroundings. The goal of the assignment is to demonstrate the need for wider use of low-noise asphalts. The results from the experimental fields show that the effects of noise reduction can be improved by mixing in rubber additives from recycled vehicle tires. Such reuse of waste tires also represents a good basis for environmentally sustainable production.

KEY WORDS

- Noise pollution,
- Traffic noise,
- Low-noise asphalts,
- Asphalts with added Rubber,
- Durability.

KAZALO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | UVOD..... | 1 |
| 1.1 | Predstavitev problema..... | 1 |
| 1.2 | Cilji naloge | 1 |
| 1.3 | Predstavitev delovnega okolja..... | 1 |
| 1.4 | Predpostavke in omejitve | 2 |
| 1.5 | Metode dela | 2 |
| 2 | HRUP IN PROMET | 3 |
| 2.1 | Splošno o hrupu | 3 |
| 2.1.1 | Zvok in hrup | 3 |
| 2.1.2 | Fizikalne lastnosti zvoka in hrupa..... | 5 |
| 2.1.3 | Vrste hrupa | 6 |
| 2.2 | Cestni promet kot vir zvočnega onesnaženja | 6 |
| 2.2.1 | Nastanek hrupa v cestnem prometu..... | 7 |
| 2.2.2 | Sestava hrupa pri pnevmatikah | 8 |
| 3 | GENERIRANJE HRUPA MED PNEVMATIKO IN VOZNO POVRŠINO | 9 |
| 3.1 | Mehanični pojavi nastanka hrupa na vozni površini..... | 9 |
| 3.1.1 | Radialne in tangencialne vibracije | 9 |
| 3.1.2 | Stranske vibracije..... | 10 |
| 3.2 | Aerodinamični pojavi nastanka hrupa na vozni površini..... | 10 |
| 3.2.1 | Turbulenca zraka | 10 |
| 3.2.2 | Resonančna luknja..... | 10 |
| 3.2.3 | Črpanje zraka..... | 11 |
| 3.2.4 | Helmholtzevo resonančno širjenje in cevna resonanca | 11 |
| 3.3 | Tornostni pojavi nastanka hrupa na vozni površini | 12 |
| 3.3.1 | Proces zlepljanje – zdrs | 12 |
| 3.3.2 | Proces zlepljanje – odtrganje | 13 |
| 3.4 | Širitveni pojavi prenašanja hrupa na vozni površini | 14 |
| 3.4.1 | Učinek roga..... | 14 |
| 3.4.2 | Absorpcija vozne površine | 14 |
| 4 | ZAKONSKE PODLAGE O OCENJEVANJU IN UPRAVLJANJU HRUPA | 18 |
| 4.1 | Evropske smernice in direktive..... | 18 |
| 4.2 | Slovenska regulativa na področju hrupa..... | 19 |
| 4.3 | Meritve hrupa | 21 |
| 4.3.1 | Metoda SPB..... | 21 |
| 4.3.2 | Metoda CPX..... | 22 |
| 5 | MANJ HRUPNE ASFALTNE ZMESI | 23 |
| 5.1 | Razvoj cest | 23 |
| 5.2 | Potrebe po zmanjševanju prometnega hrupa | 23 |
| 5.3 | Vpeljava manj hrupnih asfaltov..... | 24 |
| 5.4 | Vrste manj hrupnih obrabnih asfaltnih zmesi | 25 |
| 5.4.1 | Bitumenski beton (AC) | 26 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.4.2 | Drobir z bitumenskim mastiksom (SMA) | 27 |
| 5.4.3 | Drenažna asfaltna plast – drenažni asfalt (PA) | 30 |
| 5.4.4 | Gumirane bituminizirane asfaltni zmesi (RAM) | 33 |
| 5.4.5 | Posebne nizkohrupne vozne površine | 35 |
| 5.5 | Proizvodnja asfaltni zmesi | 35 |
| 5.5.1 | Reciklaža odpadnih asfaltni zmesi | 36 |
| 6 | IZVEDBA TESTNEGA POLJA NIZKOHROPNEGA ASFALTA NA CESTI STARI TRG–BREZOVICA | 38 |
| 6.1 | Namen in cilj izvedbe testnega polja | 38 |
| 6.2 | Predstavitev in potek izvedbe testnega polja | 38 |
| 6.3 | Preiskave vgrajenih asfaltni zmesi in meritve hrupa | 39 |
| 7 | ZAKLJUČEK | 41 |
| 8 | LITERATURA IN VIRI | 42 |
| 9 | PRILOGA: Poročilo o izvedbi meritev emisije hrupa tekočega prometa na poskusnem polju | 45 |

KAZALO SLIK

| | |
|--|----|
| Slika 1: Prikaz ravni hrupa v okolju (Vir: Decibel.si, 2023) | 4 |
| Slika 2: Frekvenčno območje spektra slišnega zvoka (Vir: Bilban, 2020)..... | 5 |
| Slika 3: Krivulji vrednotenja hrupa A in C (Vir: Bilban, 2020)..... | 5 |
| Slika 4: Nastanek radialnih in tangencialnih vibracij (Vir: Hribar, 2006)..... | 9 |
| Slika 5: Nastanek vibracij na zunanjem plašču in stranski steni (Vir: lasten, 2024) | 10 |
| Slika 6: Črpanje zraka iz kanalov pnevmatike (Vir: Hribar, 2006)..... | 11 |
| Slika 7: Helmholtzevo resonančno širjenje: levo – osnovni model, desno – pnevmatika (Vir: Hribar, 2006) | 12 |
| Slika 8: Zlepljanje – zdrs (Vir: Hribar, 2006) | 13 |
| Slika 9: Adhezija »zlepljanja – odtrganja« (Vir: Hribar, 2006) | 13 |
| Slika 10: Učinek roga (Vir: Hribar, 2006) | 14 |
| Slika 11: Absorbcija in odboj hrupa (Vir: lasten, 2024)..... | 14 |
| Slika 12: Aplituda in dolžina vala (Vir: Bolčina, 2014) | 15 |
| Slika 13: Mikro in makrotekstura (Vir: Bolčina, 2014)..... | 15 |
| Slika 14: Shematični in praktični prikaz meritev hrupa po metodi SPB (Vira: TSC 06.640:2003 in ZAG, 2019)..... | 22 |
| Slika 15: Shematični in praktični prikaz meritev hrupa po metodi CPX (Vira: TSC 06.640:2003 in lasten vir, 2024)..... | 22 |
| Slika 16: Videz vozne površine z obrabno plastjo bituminizirane zmesi bitumenskega betona AC-surf 11 (Vir: Henigman et. al., 2016)..... | 26 |
| Slika 17: Mejni krivulji območja za zmesi kamnitih zrn za bitumenski beton AC 11- surf 8 (Z3) (Vir: ZAS, 2010)..... | 27 |
| Slika 18: Prerez (sestava) močno povečane plasti SMA (Vir: Henigman, 2016) | 28 |
| Slika 19: Mejni krivulji za zmesi kamnitih zrn drobirja z bitumenskim mastikom SMA 8 (Vir: ZAS, 2010) | 29 |
| Slika 20: Vozna površina drenažnega asfalta PA 11 (Vir: Henigman, 2016)..... | 31 |
| Slika 21: Mejni krivulji območja zrnivosti za zmes kamnitih zrn za drenažni asfalt PA 11 (Vir: Henigman, 2016) | 32 |
| Slika 22: Videz površine iz gumirane asfaltne zmesi po suhem postopku (Vir: CTS, 2024)..... | 34 |
| Slika 23: Pregled spektrov CPX v odvisnosti od frekvence (Vir: ZAG, 2023) | 40 |

KAZALO TABEL

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Mejne vrednosti kazalcev hrupa za območje III. (Vir: Uredba, 2019)..... | 20 |
| Tabela 2: Značilne vrednosti izmerjenih ravni hrupa pri velikih hitrostih osebnih in večosnih tovornih vozil za obrabne plasti (Vir: Henigman et. al., 2016)... | 25 |
| Tabela 3: Rezultati hrupnosti po CPX metodi in primerjava z referenčno vozno površino (Vir: ZAG poročilo meritev, 2023) | 40 |

KRATICE IN AKRONIMI

| | |
|--------------------|--|
| AC surf: | Asfaltna zmes iz bitumenskega betona (<i>Asphalt concrete–surface</i>) |
| ARSO: | Agencija za okolje Republike Slovenije |
| CEDR: | Združenje Evropskih upravljavcev cest (<i>Conference of European Directors of Roads</i>) |
| CPX: | Metoda meritve emisij hrupa neposredno na viru (<i>Close ProXimity method</i>) |
| dB(A): | Raven jakosti zvoka ali zvočnega pritiska, vrednoteno na zaznavanje slišnosti človeka |
| DRI: | Družba za upravljanje investicij, d. o. o. |
| EEA: | Evropska agencija za okolje |
| END Direktiva: | Direktiva Evropskega parlamenta in Sveta št. 2002/49/ES o ocenjevanju in upravljanju okoljskega hrupa |
| EU: | Evropska unija |
| Hz: | Herz je izpeljana enota za frekvenco zvoka, ki je izražena s številom sprememb nihanja (valovanje) na sekundo, $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ |
| L _{dvn} : | Raven celodnevnega hrupa |
| L _{noč} : | Raven celonočnega hrupa |
| NIJZ: | Nacionalni inštitut za javno zdravje |
| PA asfalt: | Drenažni asfalt (<i>Porous asphalt</i>) |
| PIARC: | Svetovno cestarsko združenje (<i>World Road Association</i>) |
| RAM asfalt: | Gumirane asfaltne zmesi (<i>Rubber asphalt mixture</i>) |
| SMA: | Asfaltna zmes drobirja z bitumenskim mastiksom (<i>Stone mastix asphalt</i>) |
| SPB: | Metoda meritve emisij hrupa z merilnikom, nameščenim ob viru (<i>Statistical Pass-By method</i>) |
| SZO: | Svetovna zdravstvena organizacija (<i>WHO</i>) |
| TSC: | Tehnične specifikacije za ceste |
| TSPI: | Tehnične specifikacije za prometno infrastrukturo |
| ZAG: | Zavod za gradbeništvo Slovenije |
| ZRMK: | Gradbeni inštitut – Zavod za raziskavo materialov in konstrukcij |
| ZVO-2: | Zakon o varstvu okolja – 2 |

1 UVOD

Vsak dan se vozimo po naših asfaltnih cestah in marsikdo se kot voznik zmrduje nad stanjem cest, pametuje nad njihovim vzdrževanjem – mimogrede v večini niso v nič kaj slabšem stanju kot pri naših sosedih – verjetno pa se malokdo vpraša o hrupu, ki ga kot udeleženec v prometu povzroča okolju. Poznamo onesnaževanje okolja z izpusti toplogrednih plinov iz prometa, zvočnega onesnaževanja poznajo le redki.

1.1 Predstavitev problema

Zvočno onesnaževanje kot posledica vseštevilčnejšega prometa vpliva na zdravje ljudi in kot tako postaja pereče okoljsko vprašanje. Z zmanjšanjem emisij prometnega hrupa izboljšamo razmere v naravnem in življenjskem okolju. Hrup na vozišču generira premikajoča se pnevmatika na pospešenem prosto kotalečem se kolesu v medsebojni interakciji z vozno površino. Najučinkovitejša rešitev zmanjšanja prometnega hrupa je zmanjševanje pri njegovem izvoru. Poznamo asfaltne zmesi, ki zmanjšujejo emisije hrupa v okolico. Izkušnje so pokazale, da z dodajanjem gumiranih dodatkov iz odpadnih avtomobilskih gum učinke zmanjševanja hrupa asfaltnih površin lahko še izboljšamo.

1.2 Cilji naloge

Osnovni namen diplomskega dela je predstaviti vrste in značilnosti nizkohrupnih asfaltov in s pomočjo okoljskih regulatorjev predstaviti načine nižanja hrupa na izvoru. Cilj naloge je prikazati potrebo po širši uporabi nizkohrupnih asfaltov in na podlagi izkušenj iz poskusnih polj izboljšanja lastnosti z dodatki iz gume kot najučinkovitejše za zmanjševanje hrupa. Poleg nižanja hrupa imajo takšne asfaltne zmesi boljše vozne lastnosti (večjo tornost, nižjo obrabo). Uporaba recikliranih asfaltnih materialov zvišuje okoljsko ozaveščenost (krožno gospodarstvo). Poziv deležnikom k večji uporabi asfaltnih zmesi z dodatki gume.

1.3 Predstavitev delovnega okolja

Spremljanje razvoja asfaltnih tehnologij in spodbujanje uporabe novitet v praksi, med katerimi spada tudi večja uporaba nizkohrupnih asfaltnih zmesi na voziščih državnih cest v upravljanju Direkcije RS za infrastrukturo, spada v okvir mojega dela. Zaposlen sem v DRI, družbi za upravljanje investicij, d. o. o., ki za omenjeno direkcijo in za ostale naročnike (kot npr. DARS, 2TDK) nudi inženirsko in konzultantsko podporo pri vzdrževanju in obnovi cest v Republiki Sloveniji.

1.4 Predpostavke in omejitve

V preteklosti se je premalo pozornosti posvečalo težavam in vplivom hrupa z vozišč na življenjski prostor. Zmanjševanje hrupa se ni osredotočalo na mesto samega izvora (interakcija asfaltna površina – guma). Uvajanje prvih manj hrupnih asfaltov je bilo težavno, saj je bila proizvodnja v primerjavi s klasičnimi asfaldi zahtevnejša. Z novimi dognanji in pozitivnimi izkušnjami nizkohrupnih asfaltov s poskusnih polj in z dodatki iz gume v asfaltne zmesi se je proizvodnja in uporaba povečala.

1.5 Metode dela

Pri pisanju diplomske naloge je kot izhodišče za prikaz zvrsti asfaltov in njihove uporabe uporabljena opisna metoda. Z uporabo strokovne literature smo razpoložljive vire združili in prikazali teoretični mehanizem nastanka hrupa. S kombinacijo deduktivno-induktivne metode smo z interakcijo pnevmatike in vozne površine, kot najučinkovitejši način reševanja, predpostavili zniževanje hrupa na izvoru. Praktične izkušnje iz vodilnih evropskih držav smo primerjali z izkušnjami pri nas. V zaključku smo z metodo sinteze združili izkušnje in teoretična dejstva ter potrdili predpostavko. Potrdili smo uporabo obstoječih asfaltnih zmesi za znižanje emisij hrupa v okolje in njihovo izboljšanje z dodatki iz odpadne gume kot okoljsko najbolj trajnostno naravno.

2 HRUP IN PROMET

Hrup v okolju je vsak nezaželeni ali škodljiv zunanji zvok, ki ga povzročajo človeške dejavnosti na prostem vključno s hrupom cestnega prometa. Hrup, ki ga povzroča cestni promet, je eden od najbolj motečih okoljskih dejavnikov. Vpliva na kakovost življenja ljudi in živali. Ima tudi negativen vpliv na koncentracijo in produktivnost ter povečuje tveganje za prometne nesreče, saj lahko moti voznike in druge udeležence v prometu.

Zaradi zahtev po trajnostnem razvoju, želj po čistejšem in bolj naravnem okolju, se je pojavila potreba po nadzoru hrupa. Vpliv hrupa na naše zdravje in storilnost pa nadzor tudi ekonomsko opravičuje.

Ukrepi za zmanjšanje hrupa v prometu so ključni za izboljšanje kakovosti življenja urbanega prebivalstva in ohranjanje zdravega okolja. Reševanje teh težav zahteva celovit pristop, ki vključuje tako tehnične kot tudi zakonodajne ukrepe. Tehnične strategije za zmanjšanje hrupa vključujejo uporabo materialov za zmanjšanje hrupa na cestah, zmanjšanje hitrosti vozil, oblikovanje bolj tihih pnevmatik, omejevanje prometa v določenih območjih, nameščanje zvočnih ovir in omejitev hrupa vozil ter spodbujanje rabe prometnih pripomočkov z manj hrupa. Za doseg dolgoročnih rešitev je potrebno tudi sprejetje ustreznih zakonodajnih ukrepov, kot so omejitve hitrosti, vzdrževanje cest, omejevanje prometa v občutljivih območjih in spodbujanje rabe javnega prevoza. Poleg tega je pomembno ozaveščanje javnosti o problematiki hrupa v prometu ter spodbujanje odgovornega in spoštljivega ravnanja v prometu.

2.1 Splošno o hrupu

Hrup je zvok, ki nas moti, obremenjuje, ogroža in nenazadnje tudi škodi. Pri preveliki izpostavljenosti ima razne kratkoročne in dolgoročne negativne učinke, ki na človeka delujejo na psihološki bazi (vznemirjenje, stres), zaznavni (zmanjšana sposobnost dojetja) in fiziološki bazi (trajne okvare sluha, srčno-žilne bolezni).

Hrup ni enolično definiran, ker vsebuje tudi osebno noto, torej odnos posameznika do določenega zvoka. Izraza hrup in zvok sta med seboj povezana, vendar ju moramo razlikovati.

2.1.1 Zvok in hrup

Zvok ali zvočno valovanje je pojav, ki nastane pri mehanskem nihanju materialnih delcev v nekem mediju, ki imajo maso in elastičnost ter delujejo v slišnem področju frekvenc. Če je zvočna informacija razumljiva, koristna ali prijetna, potem je to želena

informacija, če pa je informacija nerazumljiva, nekoristna ali moteča, potem je to neželena informacija.

Hrup je torej neželena oblika zvoka. V fizikalnem smislu se zvok in hrup ne razlikujeta. V obeh primerih gre za valovanje oz. nihanje materialnih delcev. »Zaznava hrupa je odvisna od njegove jakosti, frekvence, poudarjenih tonov in podobno, sicer pa tudi od kraja in časa ter predvsem od poslušalca samega, njegovega psihofizičnega stanja, razpoloženja in trajanja izpostavljenosti /.../« (Operativni program varstva pred hrupom, 2022, str. 1).

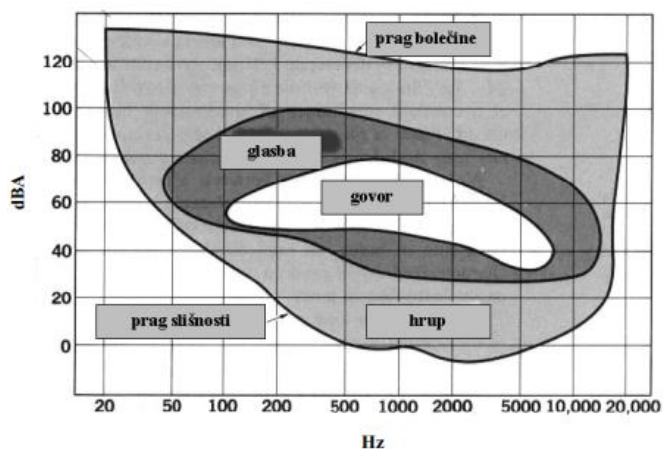
Človeško uho lahko zazna najrazličnejše tone v določenem obsegu frekvenc in ravni zvočnega tlaka. Mlad in zdrav človek ima sluh v frekvenčnem območju od 20 Hz do 20 kHz. Slišnost je omejena tudi po jakosti. Zvočna raven, izražena v decibelih (dB) je 10-kratnik desetiškega logaritma razmerja med zvočno močjo (L_w), zvočno intenzivnostjo (L_I) ali kvadratom zvočnega tlaka (L_p) in ustreznih referenčnih vrednostih. Ali zapisano v obliki vseh treh enačb: $L_w(\text{dB}) = 10 \cdot \lg(W/W_0)$ in $L_I(\text{dB}) = 10 \cdot \lg(I/I_0)$ ali $L_p(\text{dB}) = 10 \cdot \lg(p/p_0)^2$. Zaradi prevelikega razpona intenzitet se za decibel uporablja logaritemski način izražanja. Da bi lahko podali raven zvočnega tlaka zvoka, moramo poznati referenčni tlak, določen na osnovi praga slišnosti, ki znaša $2 \cdot 10^{-5}$ Pa ali $20 \mu\text{Pa}$ (velja za ton s frekvenco 1000 Hz). Najšibkejši, s človeškim ušesom še slišen zvok, je velikosti 0 dB, meja bolečine pa je 120 dB. Na sliki 1 so prikazane nekatere ravni hrupa, ki jih srečujemo v svojem vsakdanjem življenju.

| | | |
|---|-----------|---|
| bolečinska meja | 120 dB(A) |  |
|  | 115 dB(A) |  |
|  | 90 dB(A) |  |
|  | 75 dB(A) |  |
|  | 60 dB(A) |  |
|  | 45 dB(A) |  |
|  | 30 dB(A) |  |
| prag slišnosti | 0 dB(A) |  |

Slika 1: Prikaz ravni hrupa v okolju (Vir: Decibel.si, 2023)

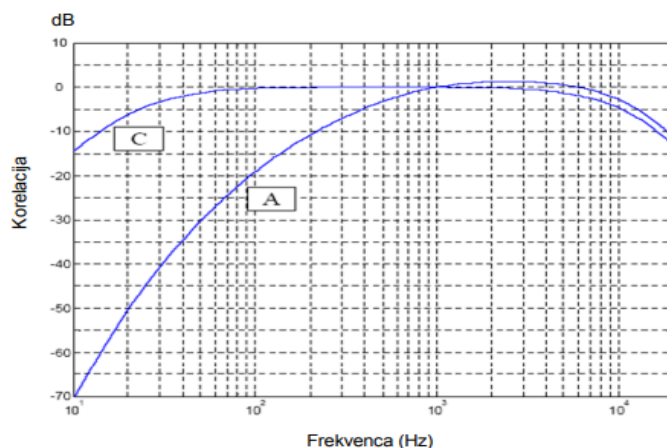
Zvoke, različnega frekvenčnega razpona, z enako jakostjo (intenziteto), človeško uho ne zaznava enako. Slika 2 prikazuje spekter slišnosti v odvisnosti od frekvenčnega območja zvoka. Zaradi slednjega je treba pri merjenju ravni jakosti uporabiti

frekvenčne filtre, ki izmerjeni signal spremenijo na podoben način kot ga človeško uho.



Slika 2: Frekvenčno območje spektra slišnega zvoka (Vir: Bilban, 2020)

Za merjenje ravni glasnosti zvoka, ki se ujema z zaznavo človeškega ušesa, je najbolj uporabna krivulja uteženja ali vrednotenja A oz. krajše A-filter. Krivulja A vrednoteno raven zvoka ustrezno oslabi pri nizkih in visokih frekvencah, v območju največje slišnosti (med 1.000 Hz in 4.000 Hz) pa ojača. Obstajajo še ostale vrste vrednotenja. Za meritve hrupnosti v delovnem okolju se uporablja npr. krivulja C – vrednoteno, katere namen je ocenjevanje maksimalnih vrednosti hrupa (»peak vrednosti«). Na sliki 3 sta prikazani krivulji vrednotenja A in C.



Slika 3: Krivulji vrednotenja hrupa A in C (Vir: Bilban, 2020)

2.1.2 Fizikalne lastnosti zvoka in hrupa

Kakor vsak fizični pojav ima tudi hrup oz. zvok svoje fizikalne parametre, s katerimi ga lahko vrednotimo. Parametri za opis zvočnega valovanja (Passante, 2007):

- Zvočni tlak – razlika med statičnim zunanjim tlakom brez motenj in nadtlakom, ki nastane zaradi nastanka akustične motnje. Merska enota je Pascal (Pa).
- Frekvenca pove, kolikokrat se nihanje ponovi v enoti časa ene sekunde. Merska enota Herz (Hz). Zvok s frekvenco nižjo od 20 Hz imenujemo infrazvok, zvok s frekvenco višjo od 20.000 Hz pa ultrazvok.
- Amplituda predstavlja intenzivnost zvoka. Merska enota je decibel (dB), ki zajema logaritemsko razmerje med amplitudo trenutnega zvoka in amplitudo človeškemu ušesu še zaznavnega zvoka. Visoka amplituda je značilna za močan, nizka amplituda pa za šibek zvok.
- Valovna dolžina je razdalja v prostoru med dvema zgoščinama (vrhoma) vala zvoka. Merska enota je meter (m), označujemo jo s črko lambda (λ).
- Perioda je čas, ki ga potrebuje zvok, da opravi en cel nihaj tlaka.

2.1.3 Vrste hrupa

Hrup lahko razdelimo na več vrst, glede na njegov način delovanja:

- konstanten ali neprekinjen hrup (nastaja brez prekinitve in je enakomeren, npr. gradbeni stroji med delovanjem, stalni promet);
- občasni hrup (nastaja le občasno, se periodično ponavlja, zanj je značilno, da se raven zvočnega tlaka hitro poveča in spet zmanjša, npr. prevoz enega vozila, prelet letala, vožnja reševalnega vozila);
- impulzni hrup (nenaden kratek pojav skokovitega povečanja ravni zvoka za več kot 10 dB, npr. eksplozije, udarci, prometna nesreča);
- hrup s poudarjenimi toni (npr. pri gibljivih delih strojev in drugih naprav zaradi nesimetričnosti oz. neuravnoveženosti njihovih posameznih sklopov);
- nizkofrekvenčni hrup (hrup s poudarjenimi nizkimi frekvencami, ki je zaradi majhne absorpcije zaznaven tudi na velikih oddaljenostih, težko ga je omejiti, npr. veliki dizelski motorji na ladjah, vlakih ali v elektrarnah).

Razlika med vrstami hrupa je v trajanju, intenzivnosti in pogostosti njihovega pojavljanja. Cestni hrup je konstanten hrup hrupa, saj se njegova stalna prisotnost na določenem območju enakomerno ohranja skozi daljše obdobje.

2.2 Cestni promet kot vir zvočnega onesnaženja

Hrup v okolju po večini povzročajo cestni, železniški in letalski promet. »Eden največjih virov obremenitve s hrupom je zagotovo cestni promet /.../, zato ima zmanjševanje hrupa v cestnem prometu prednost pred večino drugih virov hrupa (Holeček, Sušec, & Bek, Measurement report of road traffic noise along main road Arja vas-Velenje, 2015, str. 1). V diplomski nalogi je izključno obravnavan hrup, ki ga povzroča cestni promet.

Kot navajajo na internetnih straneh NIJZ povezanih s hrupom več kot polovica svetovnega prebivalstva danes živi v urbanih območjih. Delež naj bi se po napovedih NIJZ do leta 2050 povečal na 68 %. Življenje v mestih je povezano z intenzivnim prometom, ki je njegov glavni vir hrupa. Nanj smo se, »hočeš – nočeš«, nekako navadili in se nam ne zdi več moteč. Ne glede na subjektivno doživljanje hrupa se po ugotovitvah Svetovne zdravstvene organizacije (SZO, ang. WHO) škodljivi učinki dolgotrajne izpostavljenosti hrupu kažejo v motnjah spanja, povečanem tveganju za bolezni srca in ožilja, v povečani vznemirjenosti, zmanjšani uspešnosti pri delu ali učenju, v negativnem vplivu na mentalno zdravje itd. Poročilo o okolju (ARSO, 2022) pravi, da v Evropi dolgoročna izpostavljenost hrupu v prometu vsako leto prispeva k 48.000 novim primerom ishemične bolezni srca in ožilja in 12.000 primerom prezgodne smrti.

Kot omenjeno je med vsemi viri hrupa v okolju prevladujoč hrup cestnega prometa. Razlogi so predvsem veliko število vozil, njihova zvočna moč in gostota cestne mreže. Poročilo Evropske agencije za okolje (EEA Report No 22/2019) kaže, da je bilo v Evropi leta 2017 hrupu cestnega prometa, ki presega raven celodnevnega hrupa $L_{dn} \geq 55$ dB(A), izpostavljenih skoraj 110 milijonov prebivalcev oz. 22 % vseh Evropejcev. Od teh večina (80 milijonov) živi v urbanih območjih. Podatki nazorno povedo, da cilji politike na področju zmanjševanja okoljskega hrupa še niso doseženi. Zaradi neprestane rasti mestnega prebivalstva in dvigu povpraševanja po mobilnosti bo, po napovedih Evropske agencije za okolje, malo verjetno, da bi se izpostavljenost hrupu, v prihodnosti, kaj bistveno zmanjšala.

Pri nas so podatki nekoliko drugačni. Iz zadnjih podatkov strateških kart hrupa, ki jih objavlja ARSO na podlagi Uredbe o ocenjevanju hrupa v okolju, je razvidno, da se je v letih od 2012 do 2017 število prebivalcev, ki živijo v vplivnih območjih prometnic, izpostavljenih celodnevni hrupu, zmanjšalo za 16.000. Bolj skrb vzbujajoče je povečanje skoraj enakega števila oseb, izpostavljenih hrupu v obdobju noči. Zato je eden izmed prioritarnih ciljev urejanja hrupa v okolju, da se njihovo število zmanjša.

2.2.1 Nastanek hrupa v cestnem prometu

Pri vozilih v cestnem prometu je mehanizem nastajanja hrupa kompleksen pojav. Lahko je neposreden ali posreden, odvisno od oddaljenosti vira hrupa od poslušalca.

Dejavniki izvora so lahko različni. Holeček, Sušec in Bek (2015) delijo poglobitve vire hrupa v cestnem prometu na tiste, ki izhajajo iz neposrednega delovanja vozil (motorji, ventilatorji, izpušni sistemi), tiste, ki so povezani z njihovo aerodinamiko in tiste, ki nastanejo pri stiku pnevmatike in koles ter vožnji po površini. Vozna površina (podlaga) oz. njeno skupno delovanje s pnevmatiko znatno prispeva k deležu

celotnega hrupa in postane prevladujoče z večanjem hitrosti vozila. Širjenje hrupa v okolico in v smeri poslušalca je odvisna od lastnosti zvočne upornosti podlage (akustična absorpcija).

V osnovi hrup med vozno površino in pnevmatiko nastane zaradi ustvarjanja vibracij na strukturi pnevmatike kot interakcija med vozno površino in pnevmatiko (širše opisano v poglavju 3). Pri osebnih vozilih – navedeno v publikacijah Svetovnega cestarskega združenja (PIARC, 2019) – je hrup kot posledica medsebojnega delovanja pnevmatik z voziščem, prevladujoč nad hitrostmi 40 km/h (pri tovornih vozilih nad približno 70 km/h). Pri nižjih hitrostih je prevladujoč neposredni hrup vozil, ki ga povzročata motor in izpuh vozila.

2.2.2 Sestava hrupa pri pnevmatikah

Prometni hrup, ki ga povzroča premikajoča se pnevmatika po stični vozni površini, je sestavljen iz več dejavnikov oz. fizikalnih procesov. Z večanjem hitrosti vozila se povečuje.

Hkrati lahko naenkrat slišimo več vrst prometnega hrupa.

Slišne sestavine hrupa so v glavnem:

- Kotalni hrup: vibracije, ki jih slišimo, ko se pnevmatika premika (kotali) po vozni površini asfalta.
- Hrup kot posledica trenja med tekalno plastjo pnevmatike in stično asfaltno površino.
- Zračenje: sproščanje zraka v praznih prostorih pnevmatike pri premikanju.
- Vzmetenje: nastanek hrupa zaradi ponavljajočega se procesa pritiskanja (kompresije) in sproščanja pnevmatike.
- Hrup pri trku ob ovire: hrup, ki ga povzročajo neravnine površine in trki ob razne ovire v podlagi.
- Aerodinamični hrup: strujanje okoliškega zraka ob pnevmatiki.

Podrobnosti o fizikalnih pojavih pri generiranju hrupa pnevmatika – vozna površina v poglavju 3 »Mehanizmi nastanka in širjenja hrupa na vozni površini«.

3 GENERIRANJE HRUPA MED PNEVMATIKO IN VOZNO POVRŠINO

Na stični ploskvi med vrtečo se pnevmatiko in vozno površino se ustvarja energija. Mehanizmi ali povzročitelji nastanka te energije so v osnovi razdeljeni na dve skupini. V prvi so izvorni mehanizmi, povzročeni neposredno na izvoru. V drugo skupino pa spadajo t. i. zvočno povišani mehanizmi, ki nastanejo kot posledica delovanja različnih fizikalnih pojavov (procesov). Kombinacija vseh se nato izraža kot hrup.

Kot navaja Hribar (2006) se lahko kombinacije fizikalnih pojavov, ki povzročajo hrup med pnevmatiko in vozno površino, v osnovi razvrsti v štiri pojavne skupine:

- Mehanični pojavi: udarci in trki, ki ustvarjajo radialne in tangencialne vibracije.
- Aerodinamični pojavi: hrup zaradi različnih vplivov in strujanj zraka.
- Tornostni pojavi: hrup, ki je posledica delovanja torzije.
- Širitveni pojavi hrupa zaradi vpliva neugodnih akustičnih karakteristik podlage.

3.1 Mehanični pojavi nastanka hrupa na vozni površini

Hrup kot posledica mehaničnih fizikalnih pojavov povzročajo trki profilov vrteče se pnevmatike z vozno površino oz. neravninami na njej. Ob tem se ustvarjajo vibracije, ki so med seboj povezane in se širijo radialno, tangencialno in obrobno ali stransko.

3.1.1 Radialne in tangencialne vibracije

Radialne in tangencialne vibracije nastanejo, ko posamezna rebra kotaleče se pnevmatike vstopijo in izstopijo iz stične točke z vozno površino. Ko rebro udari ob površino, se ob stisku (krčenju) ustvarijo radialne vibracije, ko izstopi iz podlage pa se zaradi povrnitve rebra v prvotno prosto lego ustvarijo še tangencialne. Ponavljajoče se radialne in tangencialne vibracije v strukturi pnevmatike povzročijo hrup. Shematični proces nastanka teh vibracij prikazuje slika 4. Nastali hrup ima največjo amplitudo pri nizkih frekvencah (območje do 1 kHz), pri čemer je spektralna sestava odvisna od hitrosti vožnje. (Žmavc, 2007).



Slika 4: Nastanek radialnih in tangencialnih vibracij (Vir: Hribar, 2006)

3.1.2 Stranske vibracije

Ogrodne ali stranske vibracije nastanejo, ko se vibracije iz profila pnevmatike zaradi medsebojnega učinka strukture vozne površine prenesejo na zunanje stene pnevmatike. Vibracije oddajajo zvok kot po principu »bobna« (slika 5).



Slika 5: Nastanek vibracij na zunanjem plašču in stranski steni (Vir: lasten)

Vibracije na zunanjem plašču so kombinacija več vrst valovanja, ki skupaj predstavljajo različen spekter frekvenc. Ugotovljeno je (Hribar, 2006), da imajo ogrodne vibracije velik učinek širjenja in so zato glavne povzročiteljice širjenja hrupa.

3.2 Aerodinamični pojavi nastanka hrupa na vozni površini

3.2.1 Turbulenca zraka

Turbulenca zraka okrog vozeče pnevmatike se nanaša na gibanje zraka, ki ga povzroča premikanje pnevmatike skozi zrak. Pri velikih hitrostih vožnje se zrak ob pnevmatiki začne gibati zelo hitro in neravno, kar povzroča turbulentni tok zraka. Turbulenca zraka nastane zaradi različnih dejavnikov, vključno z obliko pnevmatike, hitrostjo vožnje in profilom površine pnevmatike. Pri premikanju skozi zrak pnevmatike povzročajo pritiske in vrtinčenje zraka, kar vodi k ustvarjanju zvoka. Ta hrup je običajno sestavljen iz različnih frekvenc in ga lahko slišimo kot hrup vetra, ki se širi okoli vozila.

3.2.2 Resonančna luknja

Ko vozilo vozi preko grobih površin, čez neravnine ali utore (npr. dilatacije mostov, železniški prehodi) lahko zrak v pnevmatiki ustvarja resonančne valove v kanalih in profilih, ki se nato odbijajo in resonirajo v votlinah lukenj kanalov. Ta resonanca povzroči premikanje zraka v kanalih s specifično frekvenco, kar lahko povzroči nastanek hrupa, vendar je njegov prispevek skupnemu hrupu zanemarljiv.

3.2.3 Črpanje zraka

Mehanizem pojava črpanja zraka na kotaleči se pnevmatiki je povezan s spremembo tlaka zraka v kanalih in rebrih. Pri kotaljenju pnevmatike po vozišču pride tik pred stikom s podlago do odmikanja zraka od pnevmatike. Ko pride do stika s podlago, se zaradi teže vozila kanali pnevmatike deformirajo (sploščijo). Ujeti zrak v kanalih pod pnevmatiko se zgosti in pride do nadtlaka. Med odlepitvijo pnevmatike od vozišča se kanali povrnejo v prvotno stanje. Zgoščen zrak v kanalih se sprosti, kar povzroči podtlak in črpanje okoliškega zraka. Proces črpanja zraka ponazarja slika 6.



Slika 6: Črpanje zraka iz kanalov pnevmatike (Vir: Hribar, 2006)

Ponavljajoče se zgoščevanje in sproščanje zraka skozi vrzeli med rebri pnevmatike povzročata hrup. Tako nastali hrup je večji, če so pogosteje zaprti žlebovi na vozni površini oz. čim bolj gladka je vozna površina (Žmavc, 2007, str. 318).

Aerodinamični fizikalni proces črpanja zraka reber in žlebov vrteče se pnevmatike povzročata znaten hrup pri vožnji avtomobila. Kot navaja Hribar (2006), se frekvenčno območje hrupa ocenjuje med 1 in 3 kHz, zlasti če je vozna površina relativno gladka. Iz tega izhaja, da bi relativno porozna asfaltna površina s svojimi votlimi deli v strukturi pripomogla k izenačitvi nadtlaka pod rebri in zmanjšala učinek črpanja zraka, kar bi privedlo do znižanja hrupa.

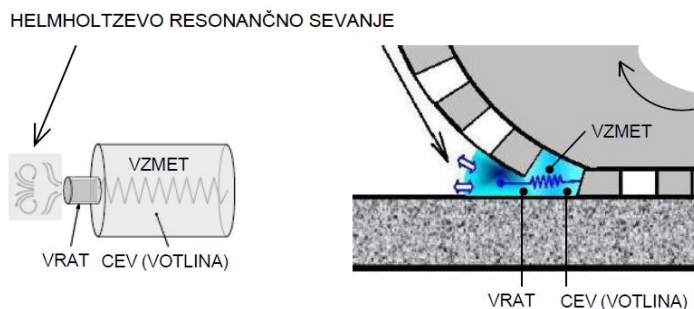
3.2.4 Helmholtzevo resonančno širjenje in cevna resonanca

Helmholtzeva resonanca se nanaša na pojav resonance zraka v votlini. Učinek je poimenovan po nemškem fiziku Hermannu Helmholtzu¹. Resonanca se pojavi, ko je zrak prisiljen vstopati v votlino (ali cev) in izstopati iz nje skozi tanjši vrat. Volumen zraka v notranjosti votline deluje kot vzmetna resonanca, ki se ojača pri izstopu skozi vrat. Če je votlina ali cev odprta na dveh koncih, je dolžina vala resonančnega zvoka dvakratnik dolžine votline. Drugače če je odprtina na enem koncu, je dolžina vala štirikratnik dolžine. Helmholtzevo resonančno širjenje je splošno prisotno v

¹ Nemški fizik, zdravnik in filozof Hermann Ferdinand von Helmholtz (1821–1894). Na področju akustike je izumil resonator ali resonančni ojačevalnik zvoka, kasneje imenovan po njem.

vsakdanjem življenju, zlasti v glasbi (trobila, brenkala). Pojavi se tudi pri pihanju čez vrh steklenice.

V primeru interakcije pnevmatika – vozišče se Helmholtzove resonance pojavijo pri zapuščanju ali »odpiranju« stične površine kolesa s podlago. Pri tem cev ali votlino predstavlja rebro in kanal pnevmatike, vrat pa odpirajoči se del stične točke s podlago. Osnovni princip delovanja Helmholtzove resonance in primer delovanja pri pnevmatiki je prikazan na sliki 7. Kot navaja Žmavc (2007, str. 318), ima tak hrup – odvisno od hitrosti vožnje – največjo amplitudo pri visokih frekvencah, v območju nad 1 kHz (visoki toni).



Slika 7: Helmholtzovo resonančno širjenje: levo – osnovni model, desno – pnevmatika (Vir: Hribar, 2006)

3.3 Tornostni pojavi nastanka hrupa na vozni površini

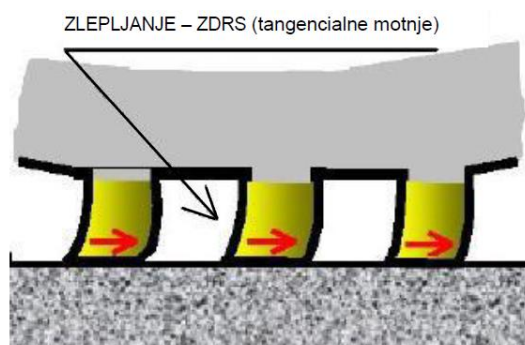
3.3.1 Proces zlepljanje – zdrs

Pojavu hrupa zaradi zlepljanja in zdrsa pnevmatike lahko rečemo tudi vibracije zaradi trenja. Pojav zlepljanje – zdrs nastane v korelaciji med maso, silo gibanja in silo trenja. Kot opisuje Hribar (2006, str. 8), se pnevmatika na kontaktni površini splošči. Nastane spremenjen radij pnevmatike, ki ustvarja tangencialne sile (horizontalne sile) med pnevmatiko in cesto (slika 8). Omenjene sile se upirajo trenju, togosti pnevmatike in preostalim silam, ki se potem razgubijo ob zdrsu pnevmatike po vozni površini. Trenje med pnevmatiko in vozno površino je razdeljeno na histerežno² in adhezijsko³ komponento trenja. Komponenta adhezije nastane zaradi preoblikovanja in prekinitve molekularnih vezi, ki jih povzročajo površinske strižne sile. Nanjo vpliva vozna površina s svojo hrapavostjo in ostrino. Pri drsenju med pnevmatiko in vozno površino se adhezijske vezi pretrgajo in razpadejo, tako da med njima ni več stika. Rebro pnevmatike je s tem prosto in lahko zdrsne po vozni površini. Ponovno je vzpostavljen

² Trajanje kakega učinka v snovi po prenehanju vzroka, npr. pri elastičnih telesih, ki se povrnejo v prvotno stanje šele po določenem času (Slovar tujk, 1974, str. 270).

³ Stanje ali lastnost sprejemljivosti med molekulami različnih ali enakih snovi (Slovar tujk, 1974).

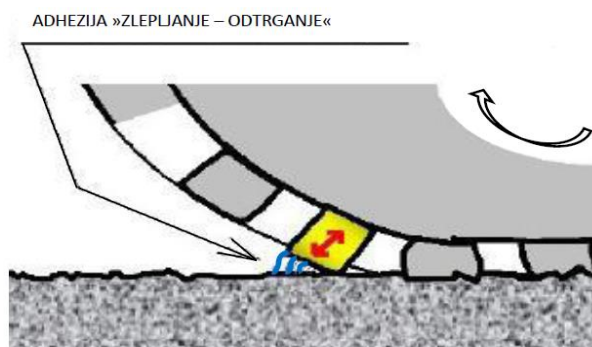
stik, ko so upirajoče se sile izničene. Histerezne sile se nanašajo na fenomen povečanja oz. deformacije gume v območju stika. Na stiku med rebrom pnevmatike in podlago nastane okoli ostrih zrn na vozni površini pritisk, ki je po velikosti simetričen na obe strani zrna. Ko se zgodi zdrs, rebro pnevmatike povzroči na sprednji strani podlage neenakomerno nalaganje in začne zavirati stik na padajočem nagibu zrna v podlagi. Pri velikih hitrostih je ta mehanizem bolj izrazit. Kombinacije zdrsa elementov s podlage kot izguba adhezije stika podlage in nastanek histereznih trenjskih sil povzročajo hrup. Temu pojavu pravimo proces zlepljanja – zdrsa pnevmatike po naležni površini.



Slika 8: Zlepljanje – zdrs
(Vir: Hribar, 2006)

3.3.2 Proces zlepljanje – odtrganje

Do nastanka zlepljanja – odtrganja pride takrat, ko postane naležna podlaga lepljiva (npr. vožnja z zimskimi pnevmatikami poleti) in na čisti vozni površini. Stik med pnevmatiko in vožno površino povzroči adhezijo med njima. Ko rebro pnevmatike zapušča kontaktno površino, adhezivna sila popušča, kot je prikazano na sliki 9. Ko se rebro sprosti (odlepi) od podlage, nastane energija, ki povzroča vibracije na obodu pnevmatike. Omenjeni fizikalni proces nima večjega vpliva k skupnemu hrupu.



Slika 9: Adhezija »zlepljanja – odtrganja« (Vir: Hribar, 2006)

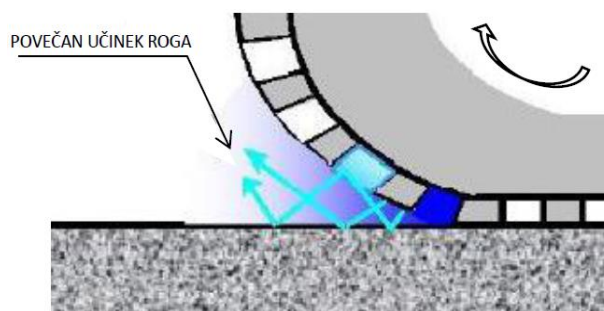
3.4 Širitveni pojavi prenašanja hrupa na vozni površini

3.4.1 Učinek roga

Stična površina in pnevmatika pri izhodu tvorita neke vrste votlino. Pojav, podoben kot pri rogu, ima za posledico učinkovitejše ustvarjanje in širjenje hrupa. Slika 10 prikazuje ta učinek roga. Proces je osredotočen na osnovi dveh lastnosti zvoka:

- povečana in zgoščena raven tlaka in
- izrazitejša moč širjenja hrupa.

Kot navaja Bončina (2014), učinek lahko poveča zvok z višjimi frekvencami do 2 kHz.



Slika 10: Učinek roga (Vir: Hribar, 2006)

3.4.2 Absorpcija vozne površine

Absorpcijski materiali »vsrkajo« del zvočne energije in jo pretvorijo v notranjo energijo (toploto). Ko zvočni valovi potujejo skozi absorpcijski material, trenje med molekulami zraka in celično strukturo materiala ustvarja toploto. Zaradi tega je energija odbitega zvočnega vala, za razliko pretvorbe v toplotno energijo, manjša od energije vpadnega vala. Kar pomeni zmanjšanje zvočnega toka (hrupa), ki se širi v okolico (slika 11). V kakšnem % se zvok absorbira, nam pove koeficient absorpcije zvoka (α). Vrednost 0 (ali 0-%) ima popolnoma refleksiven oz. odbojen material, vrednost 1 (100-%) pa popolnoma absorpcijski oz. vpojen material.



Slika 11: Absorpcija in odboj hrupa (Vir: lasten)

Absorpcijo zvočnega toka na vozni površini prevzamejo pore ali praznine v materialu vozišča, ki morajo biti znotraj materiala odprte, dostopne zraku in zvočnim valovom. Poskusi, ki so bili opravljeni, kažejo, da praviloma najboljše rezultate vpivanja zvoka dosegajo vozišča z vsebnostjo praznin več kot 18 vol.-%, in to za kotalni hrup v najpomembnejšem frekvenčnem območju od 500 Hz do 2 kHz (PIARC, 2020, str. 114).

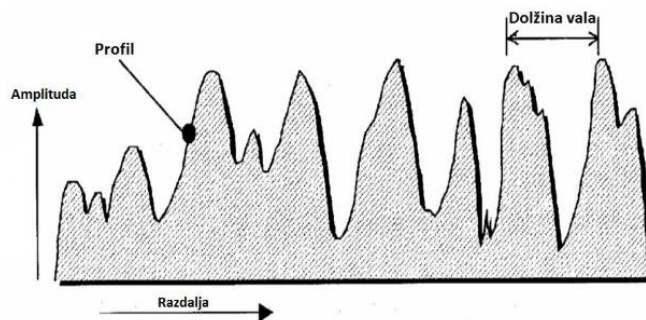
Porozna vozna površina ne absorbira vsega nastalega zvoka. Tri ključne lastnosti površine, ki vplivajo na absorpcijo, so po padajočem vrstnem redu:

- tekstura,
- poroznost,
- togost.

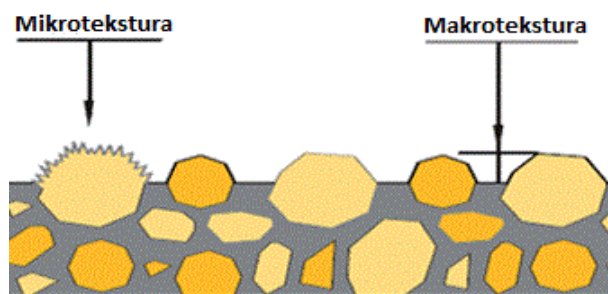
3.4.2.1 Tekstura površine

Teksturo vozne površine lahko enačimo z globino hrapavosti. Odvisna je od zrnivosti obrabne površine in morebitnih dodatnih ukrepov pri gradnji ali vzdrževanju (npr. ohrapavljenje površine, rezkanje). Kot navaja Žmavc (2007), je teksturo mogoče opredeliti z dvema parametroma: amplitudo (vertikalni odklon) in dolžino valov (vodoravna periodičnost). Ponazorjeno na sliki 12. V cestogradbeni praksi pa se za teksturo vozne površine v pretežni meri uporablja razvrstitev po PIARC (Svetovno cestno združenje), ki ločuje: (shematično prikazano na sliki 13)

- mikrostrukturo (fino hrapavost) z dolžino valov do 0,5 mm,
- makrostrukturo (grobo hrapavost) z dolžino valov med 0,5 do 50 mm,
- megateksturo z dolžino valov med 50 in 500 mm.



Slika 12: Amplituda in dolžina vala (Vir: Bolčina, 2014)



Slika 13: Mikro in makrotekstura (Vir: Bolčina, 2014)

Ker se stanje vozniških površin neprestano spreminja (zagladitev, vlaga, umazanija, poškodbe površine), ne moremo govoriti o natančnem vplivu posamezne teksture vozne površine na hrup, v splošnem pa velja:

- pri nizkih frekvencah (manj kot 1000 Hz) se hrup povečuje z amplitudo teksture v mejah dolžine valov od 10 do 500 mm,
- pri visokih frekvencah (več kot 1000 Hz) se hrup zmanjšuje z amplitudo teksture v mejah dolžine valov od 0,5 do 10 mm.

Mikrotekstura vpliva zgolj na oprijemljivost, ki pa posledično v manjši meri tudi vpliva na hrup. Makrotekstura mora zagotoviti velike amplitude v območju dolžine valov od 0,5 do 10 mm in majhne amplitude, v območju dolžine valov od 10 do 500 mm. V praksi je takšne zahteve nemogoče doseči. Ugotovljeno je bilo razmerje med globino hrapavosti in dolžino valov približno od 0,7 do 0,9, kar ustreza vozni površini z dolžino valov 5 ali 50 mm. To pomeni, da je treba za zmanjšanje hrupa v obrabne plasti vgrajevati zrna do velikosti 10 mm.

Velika megatekstura povzroči nizke frekvence hrupa. Takšni megateksturi se izognemo z uporabo drobnejših zrn drobirja v obrabni plasti. Megatekstura vozne površine mora biti tudi homogena, saj čezmerne votline v obrabni plasti povečajo megateksturo in s tem tudi hrupnost (Žmavc, 2007).

3.4.2.2 Poroznost

Poroznost vozne površine je druga lastnost, od katere je odvisna sposobnost absorpcije hrupa površine. Poroznost ali vsebnost votlin je v prostorninskih odstotkih izraženo razmerje med prostornino votlin in celotno prostornino snovi (V.-%). Pri tem gre za skupen delež površinsko odprtih in zaprtih votlin v strukturi materiala. Za absorpcijo so pomembne samo odprte votline. Asfalti, uporabljeni v večini cestnih površin, imajo poroznost manj kot 5 %, ki ne vpliva na zmožnost absorpcije. Z dvigom poroznosti na približno 20 % dosežemo zmanjšanje hrupa z absorpcijo. Zato se za zmanjševanje hrupa uporabljajo porozni asfalti. Poleg absorpcije hrupa poroznost površine zmanjša tudi hrup povzročen pri procesu črpanja zraka (opisano v poglavju 3.2.3).

3.4.2.3 Togost površine

Togost vozniških površin se nanaša na njihovo sposobnost upiranja deformacijam pod obremenitvijo. Kot vzrok za večjo hrupnost betonskih vozniških površin v primerjavi z asfaltnimi je dolgo veljala togost vozne površine. Kasneje je bilo ugotovljeno, da se pri enaki teksturi obeh vrst površin hrupnost bistveno ne razlikuje. Za raven hrupa je bolj pomembna izenačitev togosti vozišča s togostjo pnevmatike (Bončina, 2014). Bolj

prožno je vozišče, večje zadušitve hrupa lahko pričakujemo. To sicer ne gre v nedogled, saj je pogosto v nasprotju z drugimi zahtevami, kot so tehnologija, varnost in stroški. Spoznanje je močno v korist drenažno-elastičnim voznim površinam, ki so narejene iz odpadnih pnevmatik. Če se bo material v prihodnosti še razvijal in se bodo odpravile nekatere težave (zlepljenost s podlago, cena, hitra obraba ...), se bo lahko uveljavila kot zelo učinkovita površina proti nastajanju hrupa, hkrati pa bo treba določiti nove metode za določanje, kako togost takšnih podlag vpliva na hrupnost. Razvoj, ki lahko pripomore k optimizaciji togosti je uporaba epoksi modificiranih veziv v asfaltni zmesi. Vključevanje epoksi smol po nekaterih podatkih znatno poveča življenjsko dobo površine in posledično zmanjša stroške vzdrževanja (PIARC, 2020, str. 115).

4 ZAKONSKE PODLAGE O OCENJEVANJU IN UPRAVLJANJU HRUPA

Vse strožje zdravstvene in okoljske omejitve zahtevajo boljši nadzor na področju nadzora hrupa v okolju. Trajnostni materiali in izdelki, ki znižujejo emisije hrupa so vse bolj iskani in cenjeni. Zakonodaja se prilagaja tehničnemu napredku in obratno, saj je ekologija pomemben del našega vsakdana. Področje meritev hrupa in zvočnega onesnaževanja v prometu je urejeno na strani Evropske unije in na ravni države.

4.1 Evropske smernice in direktive

Težnje zmanjševanju zvočnega onesnaževanja okolja s prekomernim prometnim hrupom so v osnovah začrtane v evropskih direktivah. Evropske direktive so instrument za zagotavljanje skladnosti in enotnega pristopa na področju okoljske politike na ravni članic kot tudi na ravni skupnosti. Na področju hrupa v okolju, njegovega ocenjevanja in upravljanja so pomembne direktive:

- Direktiva 2002/49/ES Evropskega parlamenta in Sveta o ocenjevanju in upravljanju okoljskega hrupa (Direktiva END).
- Direktiva 2000/14/ES Evropskega parlamenta in Sveta o približevanju zakonodaje držav članic v zvezi z emisijo hrupa v okolje, ki ga povzroča oprema, ki se uporablja na prostem.
- Direktiva Komisije (EU) 2015/996 o določitvi skupnih metod ocenjevanja hrupa v skladu z Direktivo 2002/49/ES Evropskega parlamenta in Sveta.
- Poročilo Evropske agencije za okolje in obremenitvah z okoljskim hrupom v Evropi (EEA Report No 22/2019).

Direktiva 2002/49/ES (Direktiva END)

Direktiva 2002/49/ES, imenovana tudi Direktiva END, je glavni instrument Evropske unije za določitev obremenjenosti okolja s hrupom na ravni držav članic in na ravni skupnosti. Z namenom preprečevanja in zmanjšanja škodljivih učinkov hrupa v okolju je njen cilj skupni pristop k ocenjevanju in upravljanju hrupa. Direktiva END države članice obvezuje, da vsakih pet let (2007, 2012, 2017, itd.) izdelajo strateške karte o obremenjenosti okolja s hrupom in o njih poročajo Evropski komisiji in javnosti.

Direktiva 2000/14/ES

Cilj direktive 2000/14/ES je uskladiti zakonodaje držav članic v zvezi s standardi emisije hrupa, poenotenje postopkov za merjenje emisij hrupa, ocenjevanja skladnosti, tehnično dokumentacijo in zbiranjem podatkov o emisiji hrupa v okolje za opremo, ki se uporablja na prostem. Opredeljuje postopke notranje kontrole in zahtev proizvodnje ter pristojnim organom postopke pri ocenjevanju in merjenju hrupa.

Direktiva Komisije (EU) 2015/996

Direktiva 2015/996 nadaljuje skupni pristop Direktive END in nalaga članicam izdelavo kart izpostavljenosti z okoljskim hrupom z namenom zmanjšanja ali preprečitve škodljivih učinkov ter na podlagi kart sprejetje akcijskih načrtov.

Poročilo Evropske agencije za okolje (EEA Report No 22/2019)

Evropska agencija za okolje, na podlagi najnovejših priporočil Svetovne zdravstvene organizacije (SZO), v svojem poročilu št. 22/2019, predstavlja posodobljeno oceno prebivalstva izpostavljenega visokim ravnam okoljskega hrupa in s tem povezanih vplivov na zdravje. Med vsemi viri hrupa v okolju je prevladujoč hrup cestnega prometa. Poročilo kaže, da je bilo leta 2017 skoraj 110 mio Evropejcev izpostavljenih hrupu, ki presega dovoljeno raven celodnevne hrupa $L_{dvn} \geq 55$ dB(A).

4.2 Slovenska regulativa na področju hrupa

Republika Slovenija vključuje evropske okoljske direktive v svoj pravni sistem. Prav tako mora kot ostale članice redno poročati Evropski komisiji o implementaciji in izvajanju teh direktiv ter stanju okolja v svoji državi. Za slovenski pravni red, ki vključuje evropsko politiko na področju hrupa v okolju, so najpomembnejši:

- Zakon o varstvu okolja – ZVO-2 (Ur. list RS, št. 44/22).
- Uredba o ocenjevanju in urejanju hrupa v okolju (Ur. list RS, št. 121/04, 59/19 in 53/22).
- Uredba o mejnih vrednostih kazalcev hrupa v okolju (Ur. list RS, št. 43/18 in 59/19).
- Pravilnik o prvem ocenjevanju in obratovalnem monitoringu za vire hrupa ter o pogojih za njegovo izvajanje (Ur. list RS, št. 105/08).
- Pravilnik o emisiji hrupa strojev, ki se uporabljajo na prostem (Ur. list RS, št. 106/02, 50/05, 49/06).
- Operativni program varstva pred hrupom (MOP, št. 35400-7/2022/3 z dne 6. 10. 2022).
- Tehnične specifikacije za prometno infrastrukturo (TSPI) na področju hrupa.

Zakon o varstvu okolja (ZVO-2)

ZVO je osnovni zakon in ureja varstvo okolja pred obremenjevanjem kot temeljni pogoj za trajnostni razvoj. V tem okviru zakon določa temeljna načela varstva okolja, ukrepe varstva okolja, spremljanje stanja okolja in informacije o okolju, ekonomske in finančne instrumente varstva okolja, javne službe varstva okolja in druga z varstvom okolja povezana vprašanja. S tem zakonom se v pravni red Republike Slovenije prenašajo in implementirajo vse z okoljem povezane evropske direktive.

Uredba o ocenjevanju in urejanju hrupa v okolju

Uredba prenaša v slovenski pravni red Direktivo END z namenom, da se izogne, prepreči ali zmanjša škodljive učinke, vključno z motnjami, ki jih povzročajo izpostavljenost hrupu v okolju. Uredba določa ukrepe za zmanjšanje obremenjenosti okolja s hrupom, metode ocenjevanja hrupa v okolju, določanje izpostavljenosti hrupu, dostop do informacij in o njegovih učinkih ter pripravo operativnega programa varstva pred hrupom. Rezultat so strateške karte hrupa v Sloveniji.

Uredba o mejnih vrednostih kazalcev hrupa v okolju

Na podlagi ZVO-2 sprejeta uredba med drugim določa stopnje varstva pred hrupom, mejne vrednosti kazalcev hrupa v okolju, ukrepe varstva pred hrupom, metodologijo za pridobivanje okoljevarstvenih dovoljenj, ocene skladnosti obratovanja virov hrupa ipd. V skladu z Direktivo END določa tudi metode za ocenjevanje kazalcev hrupa. V tabeli 1 je predstavljen izsek kazalcev mejnih vrednosti hrupa za območje III. varstva pred hrupom – območje, ki si ga delita cestni in železniški promet ter industrija.

| Vir hrupa | Območje varstva pred hrupom | L _{noč} dB(A) | L _{dvn} dB(A) |
|-----------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------|
| Cestni in železniški promet | III. območje | 55 | 65 |
| Industrija | III. območje | 48 | 58 |

Tabela 1: Mejne vrednosti kazalcev hrupa za območje III. (Vir: Uredba, 2019)

Pravilnik o prvem ocenjevanju in monitoringu za vire hrupa

Pravilnik določa vrste kazalcev hrupa, ki so predmet prvega ocenjevanja in monitoringa, ter vse v zvezi z ocenjevanjem, meritvami ali modelnim izračunom hrupa.

Operativni program varstva pred hrupom

Na podlagi strateških kart hrupa (Direktiva END) se v petletnih ciklih izdelajo državni operativni program varstva pred hrupom. S programom so predstavljeni rezultati kartiranja, ki odražajo stanje hrupa, upoštevajoč prometne podatke ter na podlagi ocene obremenjenosti prebivalcev ukrepe za njihovo zmanjšanje. Vse z namenom, da se z vidika preobremenjenosti okolja s hrupom izboljša kakovost življenja ljudi, ki živijo na območjih v bližini s prometom najbolj obremenjenih železniških prog in cest.

Tehnične specifikacije za prometno infrastrukturo (TSPI)

Tehnične specifikacije za prometno infrastrukturo TSPI (po starem tehnične specifikacije za ceste TSC) predstavljajo tehnične standarde, ki se upoštevajo pri projektiranju, gradnji in vzdrževanju prometne infrastrukture.

- TSC 06.640:2003 Lastnosti vozniških površin. Hrupnost.

Tehnična specifikacija določa tehnične osnove za izračun ocenjene ravni hrupa in meritve ravni hrupa (metodi SPB in CPX), ki jo povzroča promet na cestah. Namen vrednotenja in meritev ravni hrupa je pridobiti objektivne osnove za določitev ravni hrupa v obcestnem prostoru, za načrtovanje primernih ukrepov za zaščito obcestnega prostora pred hrupom škodljive ravni in za nadziranje hrupa v obcestnem prostoru, ki ga povzroča promet na cestah. Za celovito oceno pogojuje preveritev z meritvami.

- TSC 06.418:2011 (avgust 2011) Smernice in tehnični pogoji za asfaltne obrabne plasti za zmanjšanje hrupa.

Ta tehnična specifikacija je sicer še v fazi predloga, vendar se njena vsebina in priporočila lahko uporabljajo. Smernica predlaga tehnične pogoje ter postopke priprave in izvedbe asfaltnih obrabnih plasti za zmanjšanje hrupa (gumirano bituminizirane zmesi (RAM), drobirja z bitumenskim mastiksom (SMA) in drenažnega asfalta (PA)). Asfaltne plasti za zmanjšanje hrupa so podrobno opisani v poglavju 5.4.

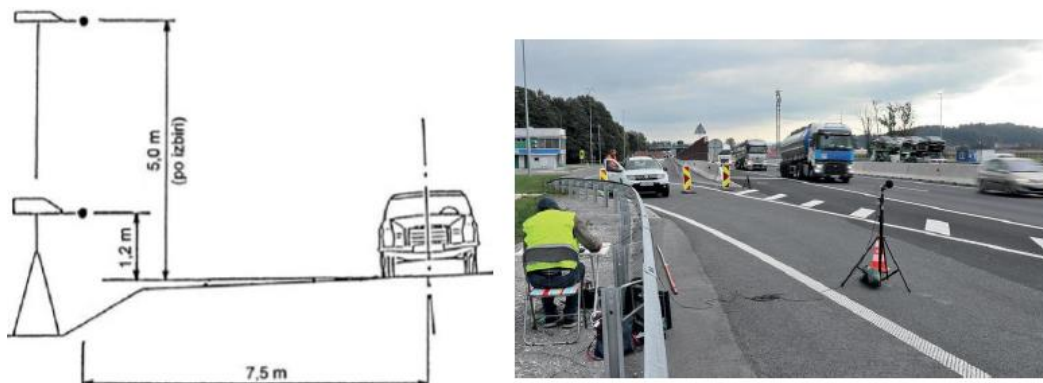
4.3 Meritve hrupa

Če želimo zmanjšati hrup, ga je potrebno najprej izmeriti. Osnova za opis hrupnih vozniških površin sta dve standardizirani meritvi:

- SPB-metoda s stacionarno nameščenim merilnikom in
- CPX-metoda z merilniki, nameščenimi ob kolesu.

4.3.1 Metoda SPB

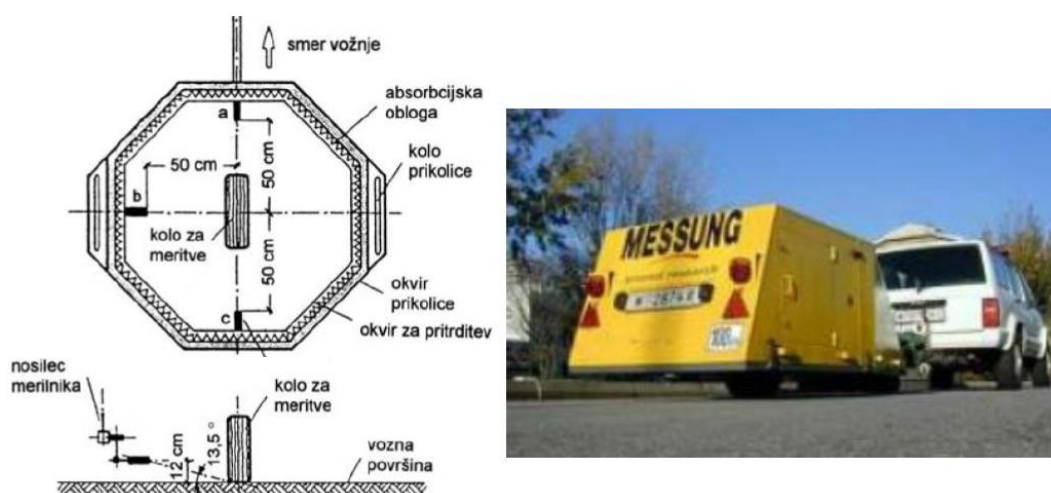
Statistična metoda SPB (*»Statistical Pass-By method«*) s stacionarno nameščenim merilnikom meri hrup mimo vozečih vozil. Metoda je povzeta po standardu SIST EN ISO 11819-1:2023. Osnova je meritev ravni hrupa kotaljenja mimo-vozečega pospešenega vozila s stacionarno nameščenim merilnikom. Mesto za postavitve najmanj dveh stacionarno nameščenih merilnikov je treba izbrati 7,50 m vodoravno od vzdolžne osi vozila, ki ga merimo in v višini 1,2 m nad površino vozišča (varianta 2: v višini 5,0 m nad voziščem). Shematični prikaz postavitve merilnikov hrupa in praktična izvedba meritev je prikazan na sliki 14. Meritve ravni hrupa mimo vozečega pospešenega vozila morajo biti izvedene, ko raven hrupa, ki ga povzročijo preostali viri (hrup okolja), ni zaznaven.



Slika 14: Shematični in praktični prikaz meritev hrupa po metodi SPB
(Vira: TSC 06.640:2003 in ZAG, 2019)

4.3.2 Metoda CPX

Statistična metoda CPX (*»Close ProXimity method«*) z merilniki, nameščenimi ob kolesu, meri emisije hrupa neposredno ob viru – ob avtomobilski gumi. Metoda je povzeta po standardu SIST EN ISO 11819-2:2023. Metoda se izvaja v optimalno kontroliranih pogojih, saj so merilniki nameščeni na posebnem kolesu za meritve v zaprti prikolici. Postopek omogoča, da so meritve brez oviranja ostalega prometa, da so vplivi zunanjih virov hrupa praktično v celoti izključeni in da so uporabljene standardne pnevmatike (SRTT). Meritev zajema celoten odsek, ki ga želimo meriti, kar zagotavlja številne podatke in zanesljivo raven hrupa kotaljenja. Shematični prikaz merilne naprave in praktična izvedba meritev je prikazan na sliki 15.



Slika 15: Shematični in praktični prikaz meritev hrupa po metodi CPX
(Vira: TSC 06.640:2003 in lasten vir)

5 MANJ HRUPNE ASFALTNE ZMESI

5.1 Razvoj cest

Podatki o gradnji cest v starejših obdobjih bivanja človeka na Zemlji so zelo skromni. Potrebo po primerno utrjenih površinah za vožnjo je človek zaznal z izumom kolesa. Ko je ob tem začel razvijati svoj razum, pa se je lahko začela šele gradnja cest. Kot prvi so, po podatkih arheologov, začeli graditi vozišča Mezopotamci pred okrog 4500 leti (2500 let pred našim štetjem). V Evropi so prvi gradili ceste Grki. Kasneje Rimljani, ki so z razmahom širili ceste tudi pri nas. Sledila so stoletja propadanja vozišč, brez gradnje novih. Šele v dobi Napoleona se je cestogradnja ponovno razmahnila. Istočasno je Škot Mc Adam razvil postopek utrditve vozišča z več plastmi enakozrnatega drobljenca in planumom posteljice vozišča nad koto talne vode, kasneje splošno uveljavljen izraz »makadam«. Kasneje, s pojavom vozov, so ceste pridobivale na nosilnosti, ravnosti in predvsem na hitrosti.

Za brezprašno utrditev vozišč se je dolgo uporabljal kamniti tlak iz lomljenca. Leta 1815 je bil na cestah na Trinidadu za brezprašno prevleko uporabljen naravni asfalt. Nadaljnji razvoj brezprašnih obrabnih plasti za prometne površine pa je bil zelo hiter. V Lyonu je leta 1829 vgrajen prvi liti asfalt. Z izumom avtomobila se je gradnja še razmahnila. Prva avtocesta je bila zgrajena leta 1924 v Italiji (Milano–Varese). V obdobju 1930–1940 se bile tudi v Sloveniji zgrajene prve sodobne ceste z asfaltnimi prevlekami. Kasneje, pri nas okrog leta 1960, je razvoj omogočil gradnjo večplastnih asfaltnih plasti (nosilni in obrabni sloj), ki jo v osnovi poznamo tudi danes. Leta 1970 je bil na odseku Vrhnika–Postojna zgrajena prva avtocesta pri nas (Žmavc, 2007).

5.2 Potrebe po zmanjševanju prometnega hrupa

Z razmahom avtomobilske industrije in pospešene gradnje prometnic na eni strani ter večanjem prebivalstva v urbanih središčih na drugi strani postane prometni hrup pereča težava. Ugotovljeno je, da se hrup s hitrostjo povečuje in da je vzrok nastanku medsebojno delovanje pnevmatike in vozne površine. Medtem ko se hrup motorja pri večjih hitrostih lahko zanemari. Za osebna vozila velja ta meja nad okoli 35–40 km/h, za tovorna vozila je ta meja zaradi njihovih specifik višja in znaša nad 60–70 km/h. (Povzeto po poročilu evropskega združenja upravljavcev cest – *CEDR Report*, 2017).

Za zmanjševanje emisij hrupa cestnega prometa so se v svetu, na začetku tega stoletja, začele intenzivne raziskave pri razvoju manj hrupnih asfaltnih plasti. Izvedba posebnih vrst asfaltnih zmesi, ki so imeli posredno lastnost tudi v zmanjševanju hrupa, sicer sega še 30 let prej, vendar pa je njihov razvoj imel drug namen (SMA-asfalt, drenažni PA-asfalt). Kasneje je bilo tudi dokazano, da so bolj zaprte asfaltne

površine, npr. bitumenski betoni (AC), načeloma tudi bolj hrupne od odprtih ali votlavih asfaltnih površin ter da raven hrupa narašča z večanjem teksture površine in velikostjo maksimalnega zrna v asfaltni zmesi. To spoznanje je bilo ključno za razmah testiranj in kasneje izvedbe prometnic iz asfaltnih zmesi za zmanjševanje hrupa (Henigman et. al., 2016).

Zahteve za izvedbo nizkohrupnih asfaltov pri nas je v letu 2011 povzela tehnična specifikacija za javne ceste (TSC 06.418:2011, predlog), ki je temeljila na izkušnjah in dognanjih iz ZDA, Kanade in Evrope. Pri razvoju manj hrupnih asfaltnih zmesi je treba poiskati kompromis med tehničnimi pristopi zmanjšanja hrupa na eni strani in zagotavljanjem primerne trajnosti in odpornosti asfaltnih zmesi na prometne obremenitve na drugi strani.

5.3 Vpeljava manj hrupnih asfaltov

Kot navaja stroka (Henigman et. al., 2016), imamo pri zmanjševanju vpliva hrupa cestnega prometa na okolje opravka z večnivojskimi ukrepi. Ti so lahko: pravno-preventivni (regulativa), plansko-prostorski (načrtovanje) in prometnotehnični ter gradbenotehnični (izvedba). Gradbenotehnični protihrupni ukrepi se delijo na:

- aktivne; pri viru nastanka (manj hrupne površine, protihrupne ograje) in
- pasivne; pri slušatelju (zaščite fasad, okna ipd.).

Skladno s predpisi o hrupu v okolju ima uporaba aktivnih protihrupnih ukrepov prednost pred pasivnimi, kar daje prednost razvoju in uporabi manj hrupnih obrabnih plasti pred drugimi ukrepi za zaščito okolja.

V okviru ukrepov za zmanjševanje hrupa na obrabnih asfaltnih plasteh je mogoče, kot ugotavlja Žmavc (2007), zagotoviti zmanjšanje hrupnosti:

- s pravilno sestavo asfaltne zmesi ali mešanice (preventiva) in/ali
- z obdelavo površine že izvedene obrabne plasti (kurativa).

Po teoriji zmanjševanja hrupa na obrabnih asfaltnih plasteh, kot nadaljuje Žmavc (2006), moramo zmanjšati lastne profilne resonance vozne površine. To dosežemo z vmesnimi prostori v obrabni plasti. Votline akustično prekinejo profilne resonatorje in z absorpcijo dosežejo zmanjšanje visokofrekvenčnega dela hrupa. Ob tem, da je zmanjševanje hrupa učinkovito, morajo vmesni prostori dosežati red velikosti 10 mm. Takšna hrapava vozna površina (tekstura) pogojuje nihanja z nizko frekvenco. Da tekstura učinkovito zaduši še nizke frekvence, ne smejo biti kamnita zrna drobirja v obrabni plasti pregroba (večja od 10 mm). Pri kurativnih ukrepih se lahko ustrezna tekstura vozne površine zagotovi z izdelavo vzdolžnega žlebičenja površine. Širina žlebov naj bo do 4 mm in globina do 10 mm.

Drugi pogled – načeloma v nasprotju z omenjeno teorijo – pravi, da so tresljaji pnevmatike, ki povzročajo hrup kotaljenja, tem manjši, čim bolj zaprta in gladka je površina obrabne plasti. Združitev obeh zahtev pomeni, da so učinkoviti površinsko bolj zaprti kot odprti vmesni prostori (votline). Vendar pa omejitev oz. mejno stanje pogojuje potrebna torna sposobnost in nosilnost vozišča.

Na protihrupnih obrabnih plasteh se lahko zmanjša hrup za 3 do 6 dB(A), v posebnih primerih celo do 9 dB(A). Učinek zmanjševanja se povečuje z večanjem hitrosti vozila. Vendar pa šele pri hitrosti vožnje nad približno 40 km/h za osebna vozila in okoli 70 km/h za tovorna vozila, kajti pri manjših hitrostih prevladuje hrup motorja.

5.4 Vrste manj hrupnih obrabnih asfaltnih zmesi

Obrabna in zaporna asfaltna zmes je vrhnja oz. zaključna asfaltna plast na vozišču. Ščiti spodnje nosilne asfaltno in nižje kamnite plasti pred vremenskimi vplivi. Izpolnjevati mora številne zahteve. Odporna mora biti na trajne deformacije. S svojo sestavo zagotavlja ravnost, stabilnost in prenos obtežbe v spodnjo nosilno plast vozišča. Poleg naštetih funkcij mora obrabna asfaltna plast omogočati primerno tesnost, varnost, udobnost, svetlost in nenazadnje absorpcijo hrupa.

Hrup povzročajo vse vrste obrabnih asfaltnih zmesi ne glede na sestavo. Glede na to, da je hrup kotaljenja pnevmatik prevladujoči vir emisij hrupa na obrabnih asfaltnih plasteh (Henigman et. al., 2016), se na naših cestah dokaj dobro spremlja (meri). Značilne obrabne asfaltno zmesi, ki so pomembne za nastanek in omejevanje hrupa:

- bitumenski beton (AC 8 surf, AC 11 surf),
- drobir z bitumenskim mastiksom (SMA 8, SMA 8 In, SMA 11, SMA 11 In) ter
- drenažni asfalt (PA 8, PA 11).

Izvedene so bile meritve hrupa za osebna vozila pri hitrosti 100 km/h in 85 km/h za večosna tovorna vozila. V tabeli 2 so prikazani povprečni rezultati meritev hrupa:

| Vrsta vozil | Vrsta bituminizirane zmesi | | |
|-------------------------------------|----------------------------|--------|------------|
| | PA 11 | SMA 11 | AC 11 surf |
| dB(A) | | | |
| Osebna vozila (100 km/h) | 75 | 78 | 82 |
| Večosna tovorna vozila (85 km/h) | 83 | 85 | 87 |

Tabela 2: Značilne vrednosti izmerjenih ravni hrupa pri velikih hitrostih osebnih in večosnih tovornih vozil za obrabne plasti (Vir: Henigman et. al., 2016)

Meritve so pokazale:

- najmanjši hrup na obrabni plasti z drenažnega asfaltna PA 11;

- nekoliko večji hrup na obrabni plasti drobirja z bitumenskim mastiksom SMA, in sicer za okoli 3 dB(A) za osebna vozila in za okoli 2 dB(A) za večosna tovorna vozila;
- največji hrup na ostalih obrabnih plasteh (AC), in sicer do okoli 6 dB(A) več od drenažnega asfalta PA 11 za primer osebnih vozil ter okoli 4 dB(A) več od drenažnega asfalta PA 11 za primer večosnih tovornih vozil.

Podobni rezultati so poznani tudi iz tujine. Kar pomeni, da so osnove in uveljavitve v naši tehnični regulativi pravilne.

5.4.1 Bitumenski beton (AC)

Obrabna asfaltna zmes bitumenskega betona (*Asphalt concrete – surface*) s kratico AC-surf, je najbolj osnovna in vsestransko uporabna asfaltna zmes. V veliki meri zadosti zahtevam za vrhnje obrabno zaporne plasti na sodobnih voziščih. Ker je najbolj običajna kot referenčna osnova, služi za razvoj drugih (specifičnih) vrst asfaltnih zmesi. To velja tudi v primeru zmanjševanja hrupnosti (tabela 2).

5.4.1.1 Sestava bitumenskega betona AC-surf

Asfaltna zmes bitumenskega betona se v osnovi vgrajuje v vse vezane plasti na voziščih (nosilna plast, vezna ali vmesna in zgornja obrabna plast). Vse plasti imajo podobno sestavo, razlikujejo se po razmerjih sestavin. Potrebni sestavi, ki zadosti tehničnimi zahtevam proizvedene asfaltne zmesi bitumenskega betona se zagotovi: s pravilno sestavo zmesi kamnitih zrn (deležem in velikostjo zrn), izbiro bitumenskega veziva in dodatkov oz. aditivov za izboljšanje lastnosti (predvsem povečanju homogenosti in zlepljenosti). Videz vozne površine asfaltne zmesi bitumenskega betona je prikazana na spodnji sliki 16.



Slika 16: Videz vozne površine z obrabno plastjo bituminizirane zmesi bitumenskega betona AC surf 11 (Vir: Henigman et. al., 2016)

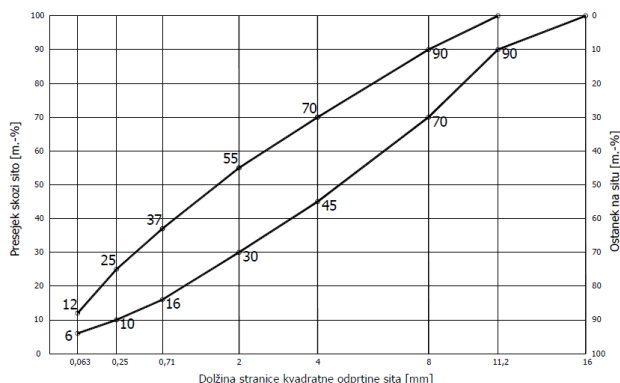
V osnovi je izbira zmesi kamnitih zrn in vrste bitumenskih veziv odvisna od prometne obremenitve vozišča. Izbira bitumenskih veziv (cestogradnji ali polimerni bitumen) se

razlikujejo tudi od klimatskih razmer, vgradnje (nadmorska višina, nagib vozišča, hitrost prometa ipd.) in termične obremenitve v postopkih vse do vgradnje.

Pod kemijske dodatke (aditive) označujemo v cestogradnji snovi, ki so pretežno organskega izvora in jih v razmeroma majhnih količinah dodajamo vezivom, zmesem ali mešanicom, da zagotovimo izboljšane lastnosti (boljša oprijemljivost, odpornost proti staranju, nižja temperatura proizvodnje ipd.).

5.4.1.2 Vhodni materiali za bitumenski beton AC-surf

V sestavi vseh asfaltnih zmesi predstavlja zmes kamnitih zrn trdno inertno osnovo za prenos prometnih obremenitev v spodnje plasti voziščne konstrukcije. Njihov masni delež v asfaltni zmesi predstavlja med 92 in 96 % (volumenski med 80 in 85 %). Za zmesi zrn so glede na funkcijo in pogoje voznih površin opredeljene tehnične lastnosti in zahteve za kakovost in postopki njihove kontrole. Sestava zmesi zrn ali porazdelitev velikosti zrn v zmesi je osnovna lastnost, ki določa njeno uporabnost. Da kamnita zmes doseže želene lastnosti v asfaltni zmesi, se praviloma sestavi znotraj obsega mejnih krivulj zrnivosti. Slika 17 predstavlja mejni krivulji območja zrnivosti za zmes kamnitih zrn za bitumenski beton AC11-surf (*asphalt surfacing*).



Slika 17: Mejni krivulji območja za zmesi kamnitih zrn za bitumenski beton AC 11-surf 8 (Z3) (Vir: ZAS, 2010)

Oblike mejnih krivulj obrabnih asfaltnih zmesi bitumenskega betona so podobne tudi za ostale nazivne zrnivosti (AC-surf 4, AC-surf 11 in obrabno-nosilni AC-surf 16).

5.4.2 Drobir z bitumenskim mastiksom (SMA)

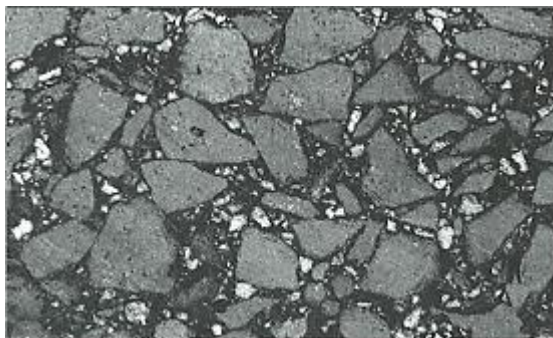
Asfaltne zmesi drobirja z bitumenskim mastiksom – kratica SMA (*Stone mastix asphalt*) so značilne za vgradnjo v obrabno-zaporne plasti, ki se na voziščnih konstrukcijah uveljavljajo predvsem za zmanjšanje čezmernega preoblikovanja. Za vozišča, ki so obremenjena s težkim do izrazito težkim prometom. Zaradi dobre

odpornosti proti prometnim obremenitvam, trajnosti in pozitivnega vpliva na zmanjšanje hrupa, se povečuje njihova uporaba tudi na mestnih in manj obremenjenih prometnicah.

SMA so razvili v Nemčiji sredi 60-ih let prejšnjega stoletja za povečanje odpornosti proti poškodbam gum ježevk (Henigman, 2016). Pri nas je bil SMA (takrat še imenovan DBM – drobir z bitumenskim mastiksom) prvič vgrajen leta 1990 na poskusnem polju na državni cesti na Vrhniki proti naselju Verd. Kasneje se je njegova uporaba močno razmahnila predvsem z vgradnjo na odsekih avtocest.

5.4.2.1 Sestava SMA

SMA je sestavljen iz velike količine kamnitega drobirja z majhno vsebnostjo peska ter velikim deležem bitumna. Debelejši film bitumenskega veziva, ki ovija kamnita zrna, upočasnjuje nastanek škodljivih sprememb, ki so v veliki meri posledica staranja bitumenskega veziva. Votline (praznine) v asfaltni zmesi so pretežno zapolnjene z zmesjo bitumna in polnila – mastiksa (slika 18). Zaradi homogenosti zmesi je dodan stabilizator (stabilizirajoči nosilec), ki preprečuje odtokanje veziva med transportom in vgradnjo asfalta. Stabilizator so običajno mineralna oz. celulozna vlakna.



Slika 18: Prerez (sestava) močno povečane plasti SMA (Vir: Henigman, 2016)

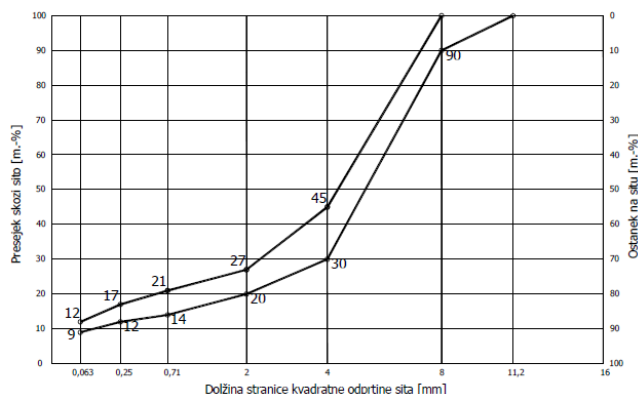
Masni deleži posameznih sestavin se lahko spreminjajo glede na lokalne pogoje in zahteve (klima, prometna obremenitev ipd.). Običajna sestava SMA (Žmavc, 2007):

- kamiti agregat od 70 do 85 m.-%,
- kamena moka (feler) od 5 do 14 m.-%,
- bitumensko vezivo od 5 do 8 m.-% in
- stabilizator od 0,3 do 1,5 m.-%.

5.4.2.2 Vhodni materiali za bituminizirane zmesi SMA

Lastnosti zmesi kamnitih zrn za bituminizirane zmesi drobirja z bitumenskim mastiksom so opredeljene v SIST 1038-5, kjer so navedene zahteve in referenčne vrednosti posameznih razredov zmesi zrn.

Zmes zrn drobirja z bitumenskim mastiksom ima večji delež večjih zrn, ki tako tvorijo skelet in manj zrn manjših od 2 mm. (Običajni asfalt beton – AC ima delež majhnih zrn večji od 40 m.-%). Za zagotovitev optimalne strukture zmesi kamnitih zrn so z mejnimi in priporočenimi vrednostmi opredeljena razmeroma ozka območja sestave in značilni strmi krivulji v območju večjih zrn in razmeroma položni v območju majhnih zrn (peski). Slika 19 prikazuje mejni krivulji za zmesi kamnitih zrn drobirja z bitumenskim mastiksom, nazivne velikosti zrn 8 mm (SMA 8).



Slika 19: Mejni krivulji za zmesi kamnitih zrn drobirja z bitumenskim mastikom SMA 8 (Vir: ZAS, 2010)

Podobne oblike mejnih krivulj zrnivosti so pretežno značilne tudi za vse ostale asfaltne zmesi z večjim deležem odprtin (votlin) npr. drenažni asfalti (PA).

5.4.2.3 Osnovne značilnosti SMA

- Hrup

Za asfaltne zmesi drobirjev z bitumenskim mastiksom je značilno, da poleg velike odpornosti proti preoblikovanju, do določene mere tudi zmanjšajo hrup, ki ga povzročajo motorna vozila. To jim omogoča večji delež odprtin v zmesi (odprta površina) in tekstura same površine. Po nadaljnjih raziskavah in na osnovi izkušenj v prometno in podnebno podobnih evropskih državah so se s povečanjem vsebnosti votlin v zmesi pridobili boljši učinki dušenja hrupa. Tako so se pri nas uveljavili manj hrupni SMA In (*low noise*) z nekoliko razširjenima mejnima krivuljama zrnivosti od običajnih SMA. Kot tudi zmesi drobirja z bitumenskim mastiksom votlave sestave SMA gg (*gap graded*) in porozne sestave SMA hg (*hollow graded*).

- Proizvodnja

Pri proizvodnji drobirjev z bitumenskim mastiksom je treba paziti na vsak korak proizvodnje. Potrebna je uporaba ustreznih agregatov, paziti je treba na ustrezno skladiščenje celuloznih ali mineralnih vlaken. Temperatura mešanja je običajno malenkost višja kot pri običajnih asfaltnih mešanica, s čimer se doseže ustrezna

viskoznost mastiksa. Mineralna ali celulozna vlakna omogočajo ustrezno vgradnjo zmesi s povečanim deležem bitumna (vlakna vpijejo bitumen in preprečijo, da bi se pri vgrajevanju bitumen izločal na površini).

Debelejši film bitumenskega veziva, ki ovija kamnita zrna, upočasnjuje nastanek škodljivih sprememb, ki so v veliki meri posledica staranja bitumenskega veziva. Bitumensko vezivo, uporabljeno v mešanici, je lahko navaden cestno-gradbeni bitumen, vendar se običajno uporablja polimerni bitumen ali bitumen z dodatkom gume, s čimer se doseže večja odpornost na deformacije in daljšo življenjsko dobo asfaltne površine.

- Torna sposobnost

Za povečanje torne sposobnosti sveže vgrajene plasti asfaltne zmesi drobirja z bitumenskim mastiksom je treba med zgoščevanjem vtisniti na površino plasti rahlo z bitumnom ovito frakcijo drobljenega grobega peska ali drobnega drobirja, npr. od 1 do 2 kg/m² (Žmavc, 2007). V primeru manj hrupnih bituminiziranih zmesi drobirja z bitumenskim mastiksom (SMA LN) pa se vgradnjo izvede brez posipa, saj bi takšen posipni material zamašil votline v obrabni plasti ter s tem izničil njihovo funkcionalnost (zmanjšanje hrupa, vodoprepustnost).

5.4.2.4 Manj hrupni drobir z bitumenskim mastikom (SMA In)

Manj hrupni drobir z bitumenskim mastiksom SMA In (*low noise*) je z vidika hrupa optimizirana zmes drobirja z bitumenskim mastiksom. Pri tem je zlasti pomembno, da se način vgradnje in stroški proizvodnje bistveno ne razlikujejo od običajnega drobirja z bitumenskim mastiksom. Ena izmed bistvenih lastnosti SMA In je povečana vsebnost votlin, s čimer je omogočena višja absorpcija zvoka. Raven hrupa se lahko zmanjša za do 5 dB(A) v primerjavi z običajno asfalt-betonsko podlago. V primerjavi z drenažnim asfaltom je pri SMA In možno pričakovati daljšo življenjsko dobo in manjše stroške vzdrževanja.

5.4.3 Drenažna asfaltna plast – drenažni asfalt (PA)

Drenažni asfalti s kratico PA (*Porous asphalt*) se po vsem svetu uporabljajo zaradi ugodnih vozni lastnosti. Začetki vgrajevanja zmesi drenažnega asfalta pri nas segajo že v 70-leta prejšnjega stoletja. Prvi primer uporabe je zabeležen na cesti Podtabor–Črnivec. Večinoma se drenažni asfalt vgrajuje na vozni površinah problematičnih za odtekanje vode (hidroplaning) in temu slabše oprijemljivosti s pnevmatikami (npr. na vijajnih prehodih, na voziščih z majhnimi prečnimi ali vzdolžnimi nagibi).

Zaradi svoje grobe teksture, razmeroma majhnega deleža zrn frakcij do 2 mm in velikega deleža votlin (več kot 20- v. %), le-te tvorijo razmeroma stabilen skelet.

Drenažni asfalti imajo izboljšano odpornost proti drsenju (boljšo tornost) in zagotavljajo dobro vidljivost v mokrem, saj zmanjšujejo pršenje vode za vozili in zastajanje vode na vozišču (sposobnost dreniranja). To v veliki meri pripomore k varnejšemu odvijanju prometa in večji pretočnosti. Na sliki 20 je prikazan videz vozne površine drenažnega asfalta nazivne zrnivosti 11 mm.



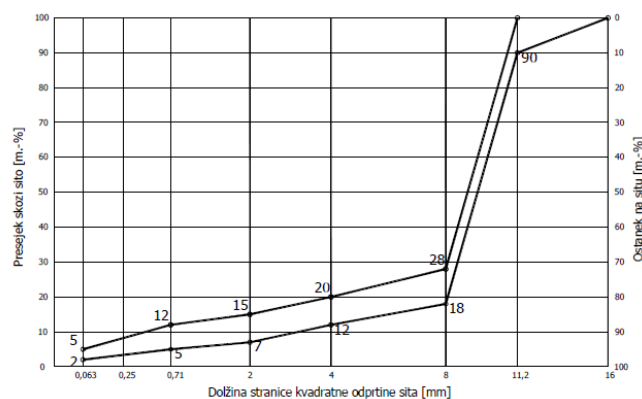
*Slika 20: Vozna površina drenažnega asfalta PA 11
(Vir: Henigman, 2016)*

Površinski vodi, ki ponikne v plast drenažnega asfalta, je treba omogočiti čim hitrejši iztok iz drenažne plasti, po drugi strani pa preprečiti škodljivo pronicanje v podložno (nosilno) plast in naprej v spodnje plasti voziščne konstrukcije. Podložna plast mora biti zato zatesnjena (pobrizg bitumenske emulzije) in primerno nagnjena proti robovom vozišča.

Poleg uporabnosti v deževnih pogojih je drenažni asfalt zelo učinkovit pri zmanjševanju hrupnosti, ki jo povzroča promet. Votline v drenažnem asfaltu v veliki meri zmanjšajo moč črpanja zraka, ki predstavlja pretežni izvor prometnega hrupa (poglavje 2.3.2). Hrup pa votline v asfaltni plasti zmanjšajo tudi zaradi njihove sposobnosti absorpcije zvoka (poglavje 2.4.2).

5.4.3.1 Vhodni materiali za zmesi drenažnega asfalta PA

Za pripravo asfaltne zmesi drenažnega asfalta je treba praviloma uporabljati najkakovostnejše materiale in skrbno sestavo zmesi kamnitih zrn. Delež frakcij do 2 mm je v sestavi še zaznavno manjši kot pri bituminiziranih zmesih drobirja z bitumenskim mastiksom SMA. Ožja so tudi območja znotraj krivulj priporočenih sestav zmesi kamnitih zrn (slika 21). Pri izbiri vrste zmesi drenažnega asfalta je treba upoštevati tudi klimatske razmere, kajti določena zrnavost v zmesi lahko povzroči težave pri vzdrževanju takšnega vozišča pozimi. Specifične zahteve drenažnega asfalta torej zahtevajo skrbnost in pazljivost pri proizvodnji, vgrajevanju in kontroli.



Slika 21: Mejni krivulji območja zrnivosti za zmes kamnitih zrn za drenažni asfalt PA 11 (Vir: Henigman, 2016)

Vozne površine drenažnega asfalta, bogate z odprtimi votlinami v bitumenski zmesi, so, predvsem pri težjih prometnih obremenitvah, podvržene hitremu staranju (propadanju). Slabo lastnost prezgodnjega staranja, ki je bila predvsem značilna v zgodnejših fazah razvoja, se lahko upočasnijo z ustreznim izborom in povečanim deležem bitumenskega veziva. Optimalni vezivi, ki sta sposobni zagotoviti daljšo življenjsko dobo, sta uporaba polimernega in gumiranega bitumna. Naknadna zgostitev vgrajene drenažne plasti pod prometom in zapolnjevanje drenažnih votlin z odpadnimi snovmi (prah, delci gume, olje ipd.) predstavlja drugo slabo lastnost. To zmanjšuje drenažni učinek asfalta, prav tako učinek absorpcije hrupa. Te težave se teoretično lahko rešijo z izvedbo drenažnega asfalta v dveh slojih. V prvem zgornjem sloju so uporabljene zmesi manjših kamnitih frakcij, v spodnjem drugem sloju pa frakcije večjih kamnitih zrn.

5.4.3.2 Dvoplastni drenažni asfalt

Drenažni asfalti se praviloma v praksi vgrajujejo v eni plasti. Večji učinek zmanjšanja prometnega hrupa bi bila gradnja drenažnega asfalta v dveh slojih različnih kamnitih frakcij zrn in debelin plasti. Prve poskuse v tej smeri so začeli na Nizozemskem v začetku 90-ih let prejšnjega stoletja. Izvedli so ga po kompaktnem postopku – dve plasti drenažnega asfalta sta vgrajeni po sistemu »vroče na vroče«. S tem so dosegli primerno zgostitev vrhnje plasti, ki je kot sito in je preprečevala večjim delcem nečistoč prodiranje v spodnjo plast z večjimi votlinami, to je ohranilo votline dalj časa aktivne.

Pričakovanja in prvi rezultati koristnosti dvoplastnih asfaltov so bili spodbudni. Vendar so zaradi spoznanja o njihovi zelo zahtevni izvedbi, dvoplastni asfalti ostali v fazi razvoja in se niso uveljavili v širši praksi. Nasprotno pa se je z nadaljnjimi preskusi na

enoplastnih drenažnih asfaltih dosegel pozitiven učinek zmanjšanja hrupa s povečanjem vsebnosti votlin (tudi 24 v.-% in več) in ohranjanjem stabilnosti v zmesi.

Za asfaltne obrabne plasti za zmanjšanje hrupa, ki ga ustvarjajo motorna vozila, se postopoma uveljavljajo gumirani bitumni oz. bituminizirane zmesi drenažnega asfalta PA ali drobirja z bitumenskim mastiksom SMA, v katerih je uporabljen kot dodatek granulati gume v suhem in mokrem postopku proizvodnje.

5.4.4 Gumirane bituminizirane asfaltne zmesi (RAM)

Gumirana bituminizirana zmes s kratico RAM (*Rubber asphalt mixture*) je v skladu s tehnično smernico (TSC 06.418:2011) zmes, ki vsebuje kot vezivo (pri mokrem postopku uporabe) gumirani bitumen ali kot dodatek (pri suhem postopku uporabe) granulati gume. Razlika je torej v sami pripravi gumirane asfaltne zmesi.

Gumirane bituminizirane zmesi, proizvedene, ne glede po mokrem ali po suhem postopku, so zelo elastične in odporne proti preoblikovanju. Prav tako so od običajnih asfaltnih zmesi odpornejše proti spremembam, ki jih pogojuje staranje bitumenskega veziva. Navedene izboljšane lastnosti gumiranih bituminiziranih zmesi pomenijo, da je postopek na dolgi rok tudi bolj gospodaren.

5.4.4.1 Gumirane asfaltne zmesi po mokrem postopku

Prvi začetki proizvodnje in uporabe gumiranih asfaltnih zmesi segajo v 70-leta prejšnjega stoletja (Arizona, ZDA). Deset let kasneje tudi v Evropo. Vse od tedaj in še mnogo let kasneje so bile gumirane asfaltne zmesi proizvedene po mokrem postopku.

Gumirani bitumen je kot vezivo proizveden iz cesto-gradbenega bitumna, modificiranega z ustreznimi zrnji gume (granulati gume). V postopku priprave gumiranega bitumna morajo biti vsi materiali v segretem stanju med seboj dobro premešani. Postopek je dokaj zahteven. Ob mešanju se iz gumiranega bitumna izločijo elastomeri. Sprva zrna gume nabreknejo (do dvakratne velikosti), nato z ostalimi sestavinami (elastomeri, asfalteni, malteni) tvorijo gel. Manjši del zrn gume ostane nespremenjen v prvotni obliki modificiranega bitumna. Ta zrna iz visoko vrednega kavčuka delujejo kot vez oz. učinkujejo kot notranja ojačitev bituminizirane zmesi. Težava lahko nastane, ker je tovrstno vezivo pogosto nestabilno. V kratkem času lahko skladiščeno v cisterni pride do razplastitve. To se lahko zgodi, še preden je v celoti porabljeno pri proizvodnji gumirane asfaltne zmesi na asfaltnem obratu. Temu se lahko za krajši čas izognemo s kemičnimi dodatki, najbolje pa je, da se vezivo uporabi takoj po njegovi proizvodnji in pelje na čim krajše razdalje do asfaltne baze. Porabljeno naj bi bilo v roku 24 ur po dostavi na asfaltni obrat (Henigman, 2016).

Za zagotovitev zelenih lastnosti gumiranega bitumna mora biti v zmes cestogradbenega bitumna vmešanih od 15 do 20 m.-% granulata gume. Takšno bitumensko vezivo ustvarja debelejši film, je bolj elastično in odpornejše proti staranju.

5.4.4.2 Gumirane asfaltne zmesi proizvedene po suhem postopku

Za razliko od mokrega postopka proizvodnje, kjer se z modificiranimi zrnji gume gumirani bitumen predhodno pripravi kot vezivo, se pri suhem postopku modificirana zrna granulata gume – GRM (*Granulate rubber modified*) dodaja zmesi kamnitih zrn. V zmes kamnitih zrn se vmeša približno 3 m.-% granulata gume. To se izvaja neposredno na asfaltnem obratu pri sami pripravi gumirane asfaltne zmesi.

Začetki proizvodnje gumi granulata kot dodatka v zrnati obliki segajo pribl. 20 let nazaj v preteklost (CTS, Nemčija). Proizvodnja po suhem postopku preprostejša. Tukaj ni težav z razplastitvijo ali nestabilnostjo veziva. Pazljivost je treba posvetiti doziranju gumi modificiranega granulata na asfaltnem obratu, saj lahko pride do spremembe gumirane zmesi v območju mejnih krivulj zrnivosti oz. nehomogenosti zmesi. Seveda morajo biti asfaltni obrati temu primerno opremljeni. Na sliki 22 je prikazan videz površine gumirane asfaltne zmesi po suhem postopku.



*Slika 22: Videz površine iz gumirane asfaltne zmesi po suhem postopku
(Vir: CTS, 2024)*

5.4.4.3 Značilnosti gumirane asfaltne zmesi

Rezultati preskusov z granulatom gume modificiranih bitumnov so pokazali, da so zelo odporni proti preoblikovanju in imajo hkrati tudi dobre lastnosti pri visokih in nizkih temperaturah, boljše kot s polimeri modificirani bitumni. Uporabnost gumiranega bitumna je v trenutnih pogojih lahko optimalna.

Pogoji proizvodnje in vgrajevanja gumiranega asfalta so podobni kot za vse druge bituminizirane asfaltne zmesi. Modificirani gumi granulati je lahko le kot dodatek za

izboljšanje lastnosti. Torna sposobnost in globina hrapavosti obrabne plasti pri gumirani bituminizirani zmesi se ohranja.

Izvršene meritve hrupa na obrabnih plasteh iz gumirane bituminizirane zmesi so pokazale, v primerjavi z običajnimi podlagami iz bitumenskih betonov (AC), zmanjšanje hrupa za od 6 do 8 dB(A), pri drenažnih asfaltih, ker je gumi granulat uporabljen kot dodatek, pa še nekoliko večje.

5.4.5 Posebne nizkohrupne vozne površine

Zavedanje o problematiki prometnega hrupa na zdravje ljudi, posebej v urbanih področjih in dejstvo, da je najučinkovitejše zmanjševanje hrupa pri njegovem izvoru, je povzročilo številne raziskave in študije. Z analizami je dokazano, da imajo največji vpliv na širjenje prometnega hrupa v okolico tekstura, absorpcija in togost vozne površine (poglavje 3.4.2). Da bi se približali čim bolj idealni vozni površini v smislu zmanjševanja hrupa, so številne države, tudi Evropska unija, zagnale študije in pilotne projekte posebnih nizkohrupnih površin.

Med posebne nizkohrupne vozne podlage lahko štejemo:

- prefabricirane podlage,
- evfonične podlage,
- poroelastične podlage.

Te površine, ki v osnovi temeljijo na prefabriciranih izdelkih ali polizdelkih, so še vedno v razvojnih in testnih fazah.

5.5 Proizvodnja asfaltne zmesi

Za proizvodnjo asfaltnih zmesi je potreben ustrezen opremljen asfaltni obrat. V njem se v predhodno načrtovani recepturi s segrevanjem in mešanjem komponent (kot so: zmesi kamnitih zrn, bitumensko vezivo, polnilo in dodatki) proizvede želena asfaltna zmes.

Asfaltni obrati se med seboj razlikujejo glede na konstrukcijo ter vrsto materialov, ki jih uporabljajo pri proizvodnji asfaltnih zmesi. Glede na konstrukcijo ločimo:

- stalne ali stacionarne,
- prestavljive ali montažne in
- prestavljive ali mobilne asfaltne obrate.

Glede na način proizvodnje lahko obrate razdelimo na:

- šaržni ali postopni način proizvodnje in
- kontinuirni ali nepretrgan način proizvodnje.

Pri nepretrgani proizvodnji so proizvedene velike količine asfaltne zmesi v kratkem času (do 1.000 t/h). Zagotovljena mora biti ustrezna količinska dobava surovin in kratka transportna pot asfaltne mešanice (obrat blizu mesta vgrajevanja). Posamezne frakcije zrn se v ustrezni masni količini dozirajo v sušilno-mešalni boben, ki poleg sušenja umeša (vbrizga) določeno količino vročega bitumenskega veziva. Zaradi take kontinuirne proizvodnje lahko odpadejo nekatere vmesne faze proizvodnje, ki so v šaržnem postopku locirane na stolpu obrata (sita, silosi vročih frakcij zrn, mešalniki). Hitra in stalna proizvodnja ima tudi slabosti. Te se kažejo v »ozkem grlu« dobavljivosti in manjši natančnosti doziranja posameznih surovin (stalna predhodna kontrola) ter neprilagodljivosti hitrim spremembam naročil asfaltnih zmesi.

Pri nas in tudi drugod v Evropi se je najbolj uveljavil tip obrata z manjšo postopno ali šaržno proizvodnjo (Henigman et. al., 2016), kapacitete do 300 t/h (Slovenija). Kot omenjeno, za razliko od nepretrgane proizvodnje, ima šaržna proizvodnja več posameznih procesov in posledično natančnejšo proizvodnjo. Posamezna kamnita zrna se iz silosov transportirajo v sušilec (grelec) in z elevatorjem na vrh stolpa obrata, kjer se pred tehtanjem presejejo in začasno skladiščijo v manjše silose za vroče frakcije. Po tehtanju se v mešalniku vbrizga vroče bitumensko vezivo in dodajo ostale surovine (polnilo, dodatki). Zmešana asfaltna zmes se lahko neposredno naklada na vozilo ali začasno vsipa v silose za vročo asfaltno zmes.

5.5.1 Reciklaža odpadnih asfaltnih zmesi

Recikliranje starega asfalta (asfaltne granulate) in njegova ponovna uporaba, kot surovina je najbolj smotrna predelava odpadkov, je ekonomska nujnost zaradi ohranjanja naravnih virov. Z reciklažo dosežemo prihranek finančnih sredstev in energije, ponovno uporabo odsluženega asfalta, zmanjševanje onesnaževanja okolja in obremenitve odlagališč odpadnih gradbenih materialov. Asfalt je primarni material za izdelavo cest in hkrati je to material, ki vsebuje zelo kakovostne komponente in je s tem zelo zanimiv za postopek reciklaže.

V osnovi poznamo dva postopka reciklaže: hladna in vroča reciklaža.

Hladna reciklaža pomeni mehansko predelavo obstoječih gradbenih odpadkov vozišča, ki vsebujejo bitumenska veziva, tako da ta postanejo sekundarna surovina. Poznamo hladno reciklažo na licu mesta na vozišču (*»in-plant«*) in v proizvodnem obratu (*»in-situ«*). Pomembna značilnost hladne reciklaže je hiter postopek in celovita rekonstrukcija voziščne konstrukcije z asfaltno obrabno plastjo ob relativno majhnem

premikanju velikih količin materiala. Pri tem se lahko ponovno uporabi do 100 m.-% asfaltnega granulata.

Vroča reciklaža asfaltnega granulata v stacionarnih asfaltnih obratih vključuje njegovo predhodno toplotno obdelavo in vnos v proces vmešavanja v novo asfaltno zmes. Izkoristek asfaltnega granulata pri neposrednem dodajanju v mešalnik na obratu znaša do 30 m.-%. Pri uporabi dodatnega (vzporednega) sušilnega bobna pa je lahko do 100 m.-%.

Asfaltni granulati se lahko uporabijo kot sekundarna surovina tudi z mešanjem s kamnitim materialom spodnjih nosilnih plasti voziščne konstrukcije (kamnita greda in/ali tamponski sloj) ali za obnovo obcestnih bankin.

6 IZVEDBA TESTNEGA POLJA NIZKOHROPNEGA ASFALTA NA CESTI STARI TRG–BREZOVICA

Asfalt je kompleksen material, zato je običajna gestogradbena praksa, da se za posebne zmesi, kot je tudi nizkohrupna asfaltna zmes, pred dejansko izvedbo izvede t. i. testno ali poskusno polje. S tem se izdelovalci prepričajo, da predhodno sestavljena receptura asfaltne zmesi dosegata načrtovane rezultate.

V okviru opravljanja dela gradbenega nadzornika v DRI, družbi za upravljanje investicij, d. o. o., nad vzdrževanjem državnih cest v upravljanju Direkcije Republike Slovenije za infrastrukturo (DRSI) sem sodeloval pri izvedbi testnega polja nizkohrupnega asfaltna z dodatkom gumi modificiranega bitumna z oznako PA 8 B 50/70 A1, A2 GRM na odseku državne ceste Stari trg pri Kolpi–Brezovica.

6.1 Namen in cilj izvedbe testnega polja

Namena izvedbe poskusnega polja nizkohrupnega asfaltna sta bila dva. Primarni je omejitev in znižanje širjenja prometnega hrupa v okolico z uporabo gumi granulata, proizvedenega iz recikliranih avtomobilskih gum. Drugotni pa kasnejša širša vpeljava tehnologije proizvodnje in izdelave nizkohrupnih asfaltov z dodatkom gume najprej na slovenske avtoceste in kasneje na ostale državne ceste obremenjene s prekomernim hrupom.

Cilj je bil z zvočnimi meritvami dokazati dejansko znižanje hrupa in s preiskavami uporabljene asfaltne zmesi dokazovati ustrezno trajnost zmesi v primerjavi s klasičnimi asfaltnimi zmesmi.

6.2 Predstavitev in potek izvedbe testnega polja

Izvedba testnega polja v dolžini 100 m je bila izvedena v mesecu septembru 2022, v okviru izvedbe rekonstrukcije državne ceste Stari trg–Brezovica (oznaka ceste R3-658, odsek št. 1433) med 0.400 km in 1.750 km. Izvajalec del, družba CGP, d. d., iz Novega mesta, je na podlagi soglasja upravljavca ceste DRSI izvedel testno polje obrabno-zapornega sloja drenažnega asfaltna (PA) z dodatkom gumi modificiranega bitumna proizvajalca CTS Bitumen GmbH iz Nemčije.

Testno polje je bilo izvedeno na državni cesti Stari trg–Brezovica z drenažno asfaltno zmesjo PA 8 B 50/70 A1, A2 GRM na dolžini 100 m v celotni širini vozišča (6 m) med

km 1.500 in 1.600. Izvajalec del CGP je asfaltno zmes proizvedel v svojem asfaltnem obratu na Drnovem pri Krškem po suhem postopku proizvodnje.

Pri izgradnji testnega polja so bili poleg izvajalca, njegove tehnološke službe in notranje kontrole proizvodnje, prisotni še predstavnik inštituta za preiskave in gradbene matirale IGMAT, d. d., ki je s svojim oddelkom za asfalte izvajal zunanjo neodvisno kontrolo in predstavnika inženirja DRI, d. o. o., ki je za upravljavca DRSI izvajal gradbeni nadzor nad celotnim projektom rekonstrukcije ceste.

Po dokončanju testnega polja je izvajalec CGP, na podlagi predhodno izdelanega tehnološkega elaborata, pripravil poročilo preiskav uporabljenih asfaltnih zmesi in poročilo izvedenih meritev hrupa z vrednotenjem rezultatov glede na zahteve in tehnične specifikacije za prometno infrastrukturo (TSC).

6.3 Preiskave vgrajenih asfaltnih zmesi in meritve hrupa

6.3.1.1 Poročilo in vrednotenje rezultatov asfaltne zmesi

Poročilo in vrednotenje rezultatov je pripravil izvajalec CGP, d. d., v okviru svoje notranje kontrole kakovosti. Kontrolo je izvajal interni laboratorij za asfalte Drnovo. Preiskave proizvedene zmesi je izvajal Inštitut BAM, inštitut za betone, asfalte in ostale meritve, d. o. o. Zunanjo neodvisno kontrolo je opravljal IGMAT, d. d., inštitut za gradbene materiale.

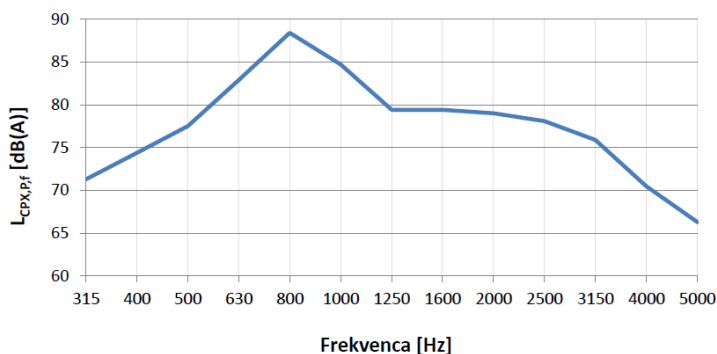
V poročilu so prikazani rezultati preiskav vgrajene asfaltne zmesi PA 8 B 50/70 A1, A2 GRM iz vzetih šest vzorcev na različnih lokacijah vgradnje:

- Zrnavost asfaltne zmesi: diagram uporabljene asfaltne zmesi kaže, da je zrnavost v okviru standardiziranih mejnih krivulj zrnivosti za tovrstne zmesi.
- Vsebnost votlin v zmesi: povprečna votlavost zmesi šestih vzorcev znaša 20,7 v.-% (zahteve med 15 in 28 v.-%).
- Zgoščenost zmesi: posamezni vzorci kažejo manjše odstopanje vendar v dovoljenih mejah. Povprečje zgoščenosti je 98,2 % (zahteva pod 97 %).
- Ostali preskusi:
 - Določanje veziva za odvodnjavanje – rezultat odtekanja veziva 0,0 m.-%.
 - Preskus obrabe delcev poroznih asfaltnih preskušancev – delež izgube 10 % (m/m) od maksimalnih 30 % (m/m).
 - Preskus občutljivosti na delovanje vode – rezultat zmanjšana natezna trdnost med suhim in mokrim stanjem preskušancev 69,3 %.

6.3.1.2 Poročilo emisij hrupa

Poročilo in meritve emisij hrupa je izvedel Zavod za gradbeništvo ZAG oz. njihov oddelek za gradbeno fiziko. (Poročilo je v prilogi diplomske naloge prikazano v celoti). Meritve hrupa so bile izvedene 30. 5. 2023 s pomočjo statistične metode CPX («close proximity»), z merilnikom tipa Brüel&Kjaer, nameščenim ob kolesu med vožnjo in vrednotene po standardu SIST EN ISO 11819-2:2017. Vremenske razmere so bile ugodne (suho vreme, povprečna temperatura zraka 20,1 °C) in niso vplivale na rezultate. Hitrost testnega vozila je bila konstantna 80 km/h.

Meritve zvočnega tlaka so bile izvedene po celotni površini testnega polja v tehničnih frekvenčnih razponih od 315 Hz do 5 kHz. Vrednoteni rezultati meritev zvočnega tlaka so prikazani na sliki 23. Iz grafa lahko opazimo, da frekvence v območju od 500 do 1.250 Hz pomembno vplivajo k skupnemu zvočnemu tlaku. Rezultati so zanimivi zlasti pri določanju emisijskih koeficientov vozne površine.



Slika 23: Pregled spektrov CPX v odvisnosti od frekvence (Vir: ZAG, 2023)

Skupna raven zvočnega tlaka $L_{CPX,P}$ (CPX indeks) znaša 92,0 dB(A). Izvedeno je bilo vrednotenje in primerjava dobljenega rezultata hrupnosti z (posebej za ta primer) referenčno asfaltno zmesjo drobirja z bitumenskim mastiksom SMA 8 (tabela 3).

| Odsek | Oznaka asfalta | Hitrost [km/h] | CPX ($L_{CPX,P}$) [dB] | SPB (račun) ($L_{SPB,veh}$) [dB] |
|--|---------------------------------|----------------|--------------------------|------------------------------------|
| R3-658/1433 km 0,400 ~ 1,750 (100 m) | PA 8 B50/70 A1, A2 (GU, KL) GRM | 80 | 92,0 | 71,1 |
| A2/0626 km 2,300 ~ 2,800 * | SMA 8 * | 80 | 98,9 | 77,4 |

Tabela 3: Rezultati ravni zvočnega tlaka (hrupnost po CPX metodi) v primerjavi z referenčno vozno površino (Vir: ZAG poročilo meritev, 2023)

Meritev testnega polja in referenčnega asfalta nazorno kaže 6,9 dB(A) nižji skupni zvočni tlak. Rezultat testnega polja nizkohrupnega drenažnega asfalta z dodatkom gumi modificiranega bitumna je skoraj malo presenetljiv in kaže na uspešno znižanje hrupa. Pomeni, da bi se tak asfalt uspešno uporabil na področju, za katerega je bil sprva namenjen.

7 ZAKLJUČEK

Zvočno onesnaženje okolja s hrupom, ki ga povzroča promet, je pereča težava sodobne družbe. Prometni hrup je od vseh virov hrupa prevladujoč. Najslabše razmere so v urbanih naseljih in v nočnem času.

Zmanjševanje zdravstvenega bremena zaradi posledic izpostavljenosti prometnega hrupa je dosegljivo le s kombinacijo tako zakonodajnih kot tehničnih ukrepov. Najučinkovitejše je omejevanje hrupa pri izvoru. To lahko med drugim dosežemo s pravilno načrtovano manj hrupno vozno površino.

V svetu in pri nas so se izoblikovale asfaltne zmesi z učinkom zmanjševanja hrupa. Temeljijo na asfaltnih zmesih s povečanim deležem votlin v plasti (drenažni asfalt PA, manj hrupni drobir z bitumenskim mastiksom SMA In) in/ali s kombinacijo gumiranih dodatkov v zmesi.

Najučinkovitejše manj hrupne asfaltne vozne površine so asfaltne zmesi z dodatkom modificiranega granulata gume. Izvršene meritve so v primerjavi z ostalimi asfaltnimi površinami pokazale, da lahko učinkovito zmanjšajo nivo hrupa za 6 ali celo do 8 db(A). Kako zelo je to učinkovito, ponazori fizikalna primerjava znižanja hrupa za 3 dB(A), ki se doseže npr. s podvojitvijo oddaljenosti od vira linijskega hrupa ali z zmanjšanjem obsega celotne prometne obremenitve za 50 %.

Z uporabo vozniških površin z dodatki iz gume pridobimo gospodarsko-ekološke koristi, ki se zaradi upočasnjene oksidacije bitumna v asfaltni zmesi kažejo v daljši življenjski dobi, zaradi kasnejših tvorb razpok v nižjih stroških vzdrževanja in ne nazadnje zaradi manj zastojev na cestah v nižjih izpušnih CO₂ v okolje. Prav tako imajo v primerjavi z ostalimi manj hrupnimi asfaldi, izboljšane vozne lastnosti in lažje prenašajo temperaturna nihanja (razširjeno območje elastičnosti). Granulat gume je zaradi večje vsebnosti naravnega kavčuka pridobljen večinoma iz recikliranih odpadnih pnevmatik tovornih vozil, kar pomeni bolj trajnostno naravnano proizvodnjo (krožno gospodarstvo).

Z vpeljevanjem manj hrupnih asfaltov smo na dobri poti. Za večjo prepoznavnost in širšo uporabo moramo seznaniti s prednostmi vse deležnike v procesu, od načrtovalcev, naročnikov in nazadnje upravljavcev prometnih površin. Seveda pa imajo nizkohrupni asfaldi tudi svoje omejitve, sicer bi lahko uspešno nadomestili vse običajne asfaltne zmesi iz bitumenskega betona (AC). Omejitve se predvsem kažejo v zahtevnejši in dražji izvedbi v primerjavi s klasičnimi asfaldi. Prav tako ne razpolagajo vsi asfaltni obrati v Sloveniji s tovrstno proizvodnjo nizkohrupnih asfaltnih zmesi. Zato se uporaba nizkohrupnih asfaltov za zdaj omejuje samo na področja (z meritvami dokazanimi) s kritičnimi območji preseganja prometnega hrupa.

8 LITERATURA IN VIRI

- [1] Cotič, Z. (2013). Uporaba gumiranega asfalta za zmanjšanje hrupa na poskusnem polju AC Divača - Kozina. *Zbornik referatov, 14. kolokvij o asfaltih in bitumnih*. Bled: Združenje asfalterjev Slovenije. Pridobljeno 5. 11 2023
- [2] Dejan, H. (brez datuma). *Referat: Hrup na vozni površini*. Pridobljeno 8. 2 2024 iz arhiva Gradbenega inštituta - ZRMK, Ljubljana: https://gi-zrmk.si/media/uploads/public/document/64-referat_hrup_prometnice_sl.pdf
- [3] *Direktiva 2000/14/ES Evropskega parlamenta in Sveta o približevanju zakonodaje držav članic v zvezi z emisijo hrupa v okolje, ki ga povzroča oprema, ki se uporablja na prostem*. (2000). Pridobljeno 2024 iz EUR-Lexa: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/14/oj>
- [4] *Direktiva 2002/49/ES Evropskega parlamenta in Sveta o ocenjevanju in upravljanju okoljskega hrupa*. (2002). Pridobljeno 2024 iz EUR-Lexa: <http://data.europa.eu/eli/dir/2002/49/oj>
- [5] *Direktiva Komisije (EU) 2015/996 o določitvi skupnih metod ocenjevanja hrupa v skladu z Direktivo 2002/49/ES Evropskega parlamenta in Sveta*. (2015). Pridobljeno 2024 iz EUR-Lexa: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2015/996/oj>
- [6] Evropska komisija. (2020). Evropski zeleni dogovor. Pridobljeno 28. septembra 2023 iz https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_sl
- [7] Henigman, S., & et. al. (2016). *Asfalt 3* (Združenje asfalterjev Slovenije v sodelovanju z Uradnim listom Republike Slovenije izd.). Ljubljana: Združenje asfalterjev Slovenije. Pridobljeno 25. januar 2024
- [8] Holeček, N. (2017). *Hrup in protihrupne tehnologije pri aparatih v domačem okolju*. Velenje: Visoka šola za varstvo okolja. Pridobljeno 4. marec 2022
- [9] Holeček, N., Sušec, P., & Bek, M. (2015). Measurement report of road traffic noise along main road Arja vas-Velenje. Velenje: VŠVO. Pridobljeno 17. marec 2024
- [10] Metod Di, B., & et. al. (2009). *Razvoj slovenskih cest: zgodovina in perspektive*. Ljubljana: Nacionalni komite PIARC Slovenija v sodelovanju z Družbo za raziskave v cestni prometni stroki Slovenije d.o.o.
- [11] O'Boy, D. J., & Dowling, A. P. (2009). *Loughborough University's Institutional Repository*. Pridobljeno 10. 2 2014 iz članka: Tyre/Road Interaction Noise- Numerical noise prediction of a patterned tyre on a rough road surface: www.djoboy.co.uk/repository/journal/OBoy_2009_2_openaccess.pdf
- [12] *Operativni program varstva pred hrupom*. (2022). Pridobljeno iz Ministrstva za okolje in prostor: https://www.gov.si/assets/ministrstva/MOP/Operativni-programi/op_hrup.pdf

- [13] *Poročilo Evropske agencije za okolje in obremenitvah z okoljskim hrupom v Evropi: Environmental noise in Europe — 2020.* (2019). Pridobljeno 2024 iz Evropske agencije za okolje: <https://www.eea.europa.eu/publications/environmental-noise-in-europe>
- [14] *Pravilnik o emisiji hrupa strojev, ki se uporabljajo na prostem.* (2006). Pridobljeno 2024 iz Uradnega lista RS, št. 106/02, 50/05 in 49/06: <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV4430>
- [15] *Pravilnik o prvih meritvah in obratovalnem monitoringu za vire hrupa ter o pogojih za njegovo izvajanje.* (2008). Pridobljeno 2024 iz Uradnega lista RS: <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/2008-01-4490?sop=2008-01-4490>
- [16] Rudolf, R. (2019). *Vpliv asfaltnih površin na hrup v okolju.* Pridobljeno 12. 28 2023 iz biltena Gradbeništvo, priloga častnika Finance: <https://www.finance.si/topgradbenistvo/vpliv-asfaltnih-povrsin-na-hrup-v-okolju/a/8982885>
- [17] *TSC 06.418:2010 (osnutek avgust) Smernice in tehnični pogoji za asfaltne obrabne plasti za zmanjšanje hrupa.* (2010). Pridobljeno 7. 1 2024 iz MZP, Tehnične specifikacije za javne ceste: <https://www.scribd.com/document/475378996/TSC-06-418-Smernice-in-tehnicni-pogoji-za-asfaltne-obra-bne-plasti-za-zmanjsanje-hrupa-avgust-2011>
- [18] *TSC 06.640:2003 Lastnosti vozniških površin hrupnost.* (2003). Pridobljeno 7. 1 2024 iz MZP, Tehnične specifikacije za javne ceste: https://www.gov.si/assets/organi-v-sestavi/DRSI/Dokumenti-DRSI/Tehnicne-specifikacije/TSC_06_640_2003_Lastnosti_voznih_povrsin_Hrupnost.pdf
- [19] Uradni list RS. (2015). Uredba o mejnih vrednostih emisij snovi v zrak iz velikih kurilnih naprav. Pridobljeno 28. september 2023 iz <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/2015-01-4109?sop=2015-01-4109>
- [20] Uradni list RS. (2021). Resolucija o Dolgoročni podnebni strategiji Slovenije do leta 2050 (ReDPS50). Pridobljeno 28. septembra 2023 iz <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/2021-01-2552?sop=2021-01-2552>
- [21] Uradni list RS. (2022). Uredba o odpadkih. Pridobljeno 16. oktober 2023 iz <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/2022-01-1772/#1.%C2%A0%C4%8Dlen>
- [22] Uradni list RS. (2022). Zakon o varstvu okolja ZVO-2. Pridobljeno 12. september 2023 iz <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/2022-01-0873?sop=2022-01-0873>
- [23] *Uredba o mejnih vrednostih kazalcev hrupa v okolju.* (2019). Pridobljeno 2024 iz Uradnega lista RS, št. 43/18 in 59/19: <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED7531>

- [24] *Uredba o ocenjevanju in urejanju hrupa v okolju.* (2022). Pridobljeno iz Uradnega lista RS, št. 121/04, 59/19 in 53/22): <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/2022-01-1162?sop=2022-01-1162>
- [25] Wiebe, A., & et. al. (2017). *State of the art in managing road traffic noise: summary report.* Pridobljeno 28. 12 2023 iz CEDR - Conference of European Directors of Roads: <https://www.cedr.eu/download/Publications/2017/CEDR2017-03-State-of-the-art-in-managing-road-traffic-noise.pdf>
- [26] *Zakon o cestah - ZCes-2.* (2022). Pridobljeno april 2023 iz Uradnega lista RS, št. 132/22: www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/2022-01-3113?sop=2022-01-3113
- [27] Žmavc, J. (2007). *Gradnja cest: voziščne konstrukcije - 2. izpopolnjena izdaja.* Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- [28] Žmavc, J. (2010). *Vzdrževanje cest.* Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

9 PRILOGA: Poročilo o izvedbi meritev emisije hrupa tekočega prometa na poskusnem polju

ODDELEK ZA GRADBENO FIZIKO
Laboratorij za toplotno zaščito in akustiko



ZAVOD ZA
GRADBENIŠTVO
SLOVENIJE

SLOVENIAN
NATIONAL BUILDING
AND CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE

Dimičeva ulica 12
1000 Ljubljana
Slovenija

info@zag.si
www.zag.si

POROČILO 1174/22-520-2

o izvedbi meritev emisije hrupa tekočega prometa
na vozišču PA 8 B50/70 A1, A2 (GU, KL) GRM na
R3-658/1433 Stari trg – Brezovica med
km 0,400 ~ 1,750 na poskusnem polju v dolžini
100 m po metodi CPX

Naročnik: CGP, družba za gradbeništvo, inženiring, proizvodnjo in vzdrževanje cest, d.d.
Ljubljanska cesta 36, SI-8000 NOVO MESTO

Naročilo: Naročilo št. N-NN-22.10256 z dne 29.11.2022

Nosilec naloge: Rok Rudolf, univ. dipl. fiz.

Vodja enote: doc. dr. Katja Malovrh Rebec

Direktor: doc. dr. Aleš Žnidarič, univ. dipl. inž. grad.

Datum: 12. 7. 2023

Digitalno podpisano:
IZTOK KLEMENC, ZAVOD ZA GRADBENIŠTVO SLOVENIJE

(po pooblaščenju direktorja)

Poročilo so interno pregledale in odobrile vse navedene osebe, kar potrjuje končni elektronski podpis.
Preverjanje pristnosti dokumenta: www.zag.si/pristnost/

Rezultati preskušanja se nanašajo izključno na preskušane primerke. Poročilo se sme reproducirati samo v celoti.
Rok za reklamacije je 15 dni od izdaje poročila. Skupno število strani: 5, število prilog: 1.

ZAG-001.008-1A/1

1174/22-520-2

ZAG

1. Uvod

Za naročnika smo dne 30. 5. 2023 izvedli meritve CPX na poskusnem polju v razdalji 100 m na odseku 1433 državne ceste R3-658 (Stari trg – Brezovica) med km 0,400 ~ 1,750, in sicer po sloju vozišča z oznako PA 8 B50/70 A1, A2 (GU, KL) GRM, kot nam jo je posredoval naročnik. Gre za vozno površino, ki je v uporabi od leta 2022. Meritve CPX merijo hrup ob pnevmatiki med vožnjo. Starost vozne površine ob meritvah je bila 8 mesecev.

Slika 1: Slika sistema CPX, mikrofoni ob pnevmatiki
(Foto-archiv ZAG: 046799d-06):



Slika 2: Pregledna situacija izvedenih meritev CPX:



Na sliki 2 je z linijo prikazano območje merjenja.

Namen meritev CPX je bilo ugotavljanje relativne hrupnosti asfalta na merjenem odseku. Za merilo hrupnosti se je izračunala povprečna raven CPX za obravnavan odsek za osebne avtomobile. Informativno je zraven CPX v preglednici 2 navedena še preračunana vrednost indeksa SPB, ki bi jih na podlagi meritev CPX pričakovali na takem asfaltu (preračunano po metodi iz CEDR Tehničnega poročila 2017-1), tako da je mogoče rezultate primerjati tudi z drugimi površinami, za katere so znani SPB indeksi.

1174/22-520-2

ZAG

2. Način merjenja

Izvedene so bile meritve po metodologiji standarda SIST EN ISO 11819-2:2017, torej meritve neposredno ob vozni plasti v skladu z metodo »close proximity« (CPX).

Po tej metodi se emisije hrupa meri neposredno nad vozno površino (10 cm) ob nepogonskih gumah vozila (20 cm od gume) na dveh predpisanih lokacijah pod kotom 45°. Meri se v po tercah v pasovih med 315 Hz in 5000 Hz. Sočasno se beleži pozicija in hkrati za potrebe korekcij meri hitrost vozila ter temperatura zraka.

Merilo se je vozno površino v obe smeri pri hitrosti 80 km/h, da se je lahko izvedlo primerjavo z v poročilu 1174/22-520-1 predstavljenimi meritvami na referenčnem asfaltu SMA 8. Merilni del odseka 1433 je znašal okoli 100 m, kar je manj kot priporoča standard. Merilo se je ob referenčni gumi osebnega avtomobila (oznaka P po standardu).

3. Merilna oprema

3.1 Meritve hrupa in analiza rezultatov

Modulami analizator zvoka – merjeno dvokanalno:

- tip instrumenta 2270 Brüel & Kjær,
- identifikacijska številka instrumenta ID 3.34.01-014

Kalibrator zvoka:

- tip instrumenta 4231 Brüel & Kjær,
- identifikacijska številka instrumenta ID 1.29.03-005

3.2 Meritve hitrosti

GPS sistem Garmin za meritev lokacije in hitrosti.

3.3 Meritve pogojev okolja

Termo-higrometer z merilcem tlaka:

- tip instrumenta EXTECH RHT35
- identifikacijska številka instrumenta ID 3.08.02-105

3.4 Uporabljene gume in vozilo

Oznaka P - Referenčna guma Uniroyal SRTT M+S 215/60R17, nameščena kot zadnja desna guma na namensko prirejenem vozilu Dacia Duster ZAG-27.

4. Podatki o meritvah

4.1 Datum meritev: 30. 5. 2023

4.2 Meritve in izvednotenje rezultatov meritev

Rok Rudolf, univ. dipl. fiz.

Andraž Zalar, mag. inž. grad.

1174/22-520-2

ZAG

4.3 Vremenski pogoji ob času meritev

Vreme ob času izvedbe meritev je bilo suho in brez močnega vetra. Povprečna temperatura zraka na območju merjenega odseka tekom izvajanja meritev je bila 20,1°C. Najvišja temperatura je bila 19,8°C, najnižja pa je bila 20,4°C.

5. Rezultati meritev

Skupna raven CPX indeksa $L_{CPX,P}$ po vseh frekvencah pri hitrosti 80 km/h je 92,0 dB(A). Izmerjene povprečne vrednosti indeksa $L_{CPX,P,f}$ v terčnih frekvenčnih pasovih od 315 Hz do 5000 Hz za osebna vozila so predstavljene v preglednici 1. Vse vrednosti so povprečene prek celotnega merjenega odseka za vse prevoze merjenega odseka po voznem pasu.

Preglednica 1: Izmerjeni spektri CPX, v odvisnosti od frekvence, in skupna raven po vseh frekvencah

| Odsek | R3-656/1433 km 0,400 ~ 1,750 (100 m) |
|---------------------------------|---|
| Oznaka asfalta | PA 8 B50/70 A1, A2 (GU, KL) GRM |
| Hitrost (v_{ref}) [km/h] | 80 |
| Frekvenca [Hz] | $L_{CPX,P,f}$ [dB(A)] |
| 315 | 71,3 |
| 400 | 74,4 |
| 500 | 77,5 |
| 630 | 82,9 |
| 800 | 88,4 |
| 1000 | 84,7 |
| 1250 | 79,4 |
| 1600 | 79,4 |
| 2000 | 79,0 |
| 2500 | 78,1 |
| 3150 | 75,9 |
| 4000 | 70,5 |
| 5000 | 66,3 |
| $L_{CPX,P}$ [dB(A)] | 92,0 |

V rezultatih so že upoštevane vse korekcije v skladu s standardom SIST EN ISO 11819-2:2017, upoštevana je tudi temperaturna korekcija CPX v skladu s standardom ISO TS 13471-1:2017. Temperaturna korekcija je znašala 0,0 dB.

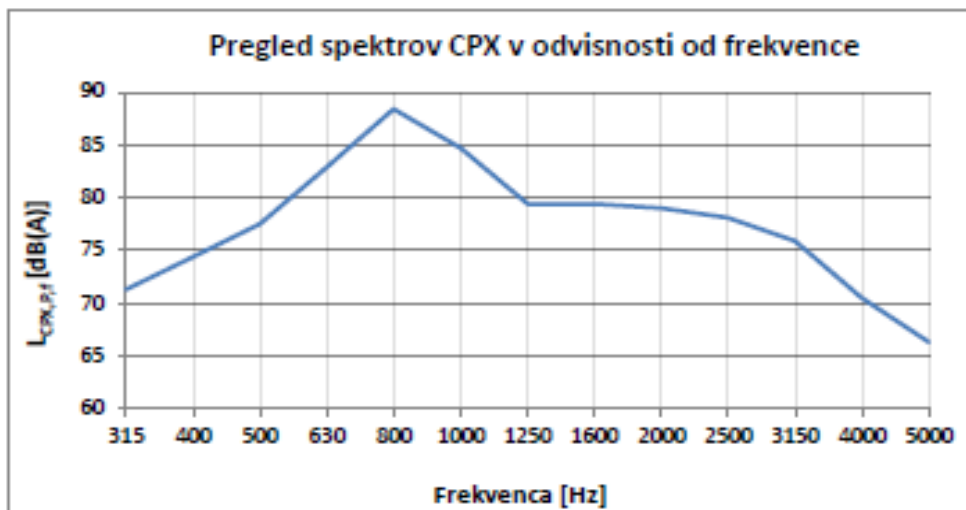
Spektralni rezultati $L_{CPX,P,f}$ so zanimivi zlasti pri določanju emisijskih koeficientov vozne površine, skupna vrednost indeksa $L_{CPX,P}$ [dB] pa se uporablja za določitev celotne hrupnosti asfaltne površine.

Rezultati iz preglednice 1 so predstavljeni v grafični obliki na grafu 1.

1174/22-520-2

ZAG

Graf 1: spektri CPX v odvisnosti od frekvence



6. Povzetek

V preglednici 2 so povzeti rezultati hrupnosti za asfaltno površino PA 8 B50/70 A1, A2 (GU, KL) GRM (na poskusnem polju v dolžini 100 m odseka R3-658/1433 med km 0,400 ~ km 1,750).

Preglednica 2: rezultati hrupnosti po metodi CPX in iz CPX meritev izračunana SPB vrednost za merjeno asfaltno površino in referenčni asfalt iz poročila 1174/22-520-1

| Odsek | Oznaka asfalta | Hitrost [km/h] | CPX ($L_{CPX,P}$) [dB] | SPB (račun) ($L_{SPB,veh}$) [dB] |
|--|---------------------------------|----------------|--------------------------|------------------------------------|
| R3-658/1433 km 0,400 ~ 1,750 (100 m) | PA 8 B50/70 A1, A2 (GU, KL) GRM | 80 | 92,0 | 71,1 |
| A2/0626 km 2,300 ~ 2,800 * | SMA 8 * | 80 | 98,9 | 77,4 |

*meritev referenčnega asfalta iz poročila 1174/22-520-1

V stolpcu »CPX« so povzeti že predstavljeni rezultati za povprečen CPX indeks prek celotnega merjenega odseka. V stolpcu »SPB (račun)« je predstavljena vrednost SPB, kot bi jo pričakovali glede na CPX meritev, preračunano po metodi iz CEDR Tehničnega poročila 2017-1. To bi bila vrednost, ki bi jo dobili, če bi izvedli množico SPB meritev po celotni dolžini merjenega odseka.

Primerjava z v poročilu 1174/22-520-1 predstavljenimi meritvami na referenčnem asfaltu SMA 8 kaže, da je hrupnost asfaltna površine PA 8 B50/70 A1, A2 (GU, KL) GRM precej nižja. Skupna raven CPX indeksa $L_{CPX,P}$ po vseh frekvencah pri hitrosti 80 km/h je pri PA 8 B50/70 A1, A2 (GU, KL) GRM nižja za 6,9 dB(A) v primerjavi z referenčnim asfaltom SMA 8.

Poročilo pripravil:
Andraž Zalar, mag. inž. grad.