

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



*PODIPLOMSKI ŠTUDIJ  
VARSTVO OKOLJA*

*DOKTORSKI ŠTUDIJ*

Kandidat:

**ŽIGA KOKALJ, univ. dipl. geog.**

**UPORABA DALJINSKEGA ZAZNAVANJA PRI  
MODELIRANJU SPREMENLJIVK DINAMIČNEGA  
CESTNINJENJA**

Doktorska disertacija štev.: 198

**MODELLING DYNAMIC ROAD PRICING VARIABLES  
WITH REMOTE SENSING**

Doctoral thesis No.: 198

Temo doktorske disertacije je odobril Senat Univerze v Ljubljani dne 23. oktobra  
2007 in imenoval mentorja izr.prof.dr. Krištofa Oštirja.

Ljubljana, 5. februar 2010



Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



Komisijo za oceno ustreznosti teme doktorske disertacije v sestavi  
izr.prof.dr. Krištof Oštir, ZRC SAZU in UL FGG  
doc.dr. David Hladnik, UL Biotehniška fakulteta  
doc.dr. Marijan Žura, UL FGG  
prof.dr. Bogomir Kovač, UL Ekonomska fakulteta  
prof.dr. Vincent L. Gaffney, Institute of Archaeology and Antiquity, University of  
Birmingham, United Kingdom.

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 6. redni seji dne  
28. marca 2007.

Komisijo za oceno doktorske disertacije v sestavi  
doc.dr. Mojca Kosmatin Fras, UL FGG  
izr.prof.dr. Krištof Oštir, mentor, ZRC SAZU in UL FGG  
izr.prof.dr. Metka Špes, UL Filozofska fakulteta  
doc.dr. Marijan Žura, UL FGG

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 5. redni seji dne  
25. novembra 2009.

Komisijo za zagovor doktorske disertacije v sestavi  
prof. dr. Matjaž Mikoš, dekan  
izr.prof.dr. Krištof Oštir, mentor, ZRC SAZU in UL FGG  
doc.dr. Mojca Kosmatin Fras, UL FGG  
izr.prof.dr. Metka Špes, UL Filozofska fakulteta  
doc.dr. Marijan Žura, UL FGG

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 7. redni seji  
dne 27. januarja 2010.





Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



## IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **ŽIGA KOKALJ, univ. dipl. geog.**, izjavljam, da sem avtor doktorske disertacije z naslovom: »**UPORABA DALJINSKEGA ZAZNAVANJA PRI MODELIRANJU SPREMENLJIVK DINAMIČNEGA CESTNINJENJA**«.

Ljubljana, februar 2010

.....  
(podpis)



## Errata

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
----------------	------------------	---------	--------



## Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček

UDK	528.8:656.1.03(043.3)
Avtor	Žiga Kokalj, univ. dipl. geograf
Mentor	izr. prof. dr. Krištof Oštir
Naslov	Uporaba daljinskega zaznavanja pri modeliranju spremenljivk dinamičnega cestninjenja
Obseg in oprema	197 str., 32 pregl., 114 sl., 22 en., 4 pril.
Ključne besede	cestninjenje, promet, zunanji stroški prometa, modeliranje ravni zvoka, hrup, zračno lasersko skeniranje, daljinsko zaznavanje

### Izvleček

Naloga obravnava sistem dinamičnega določevanja cestnine in definira kazalnike vplivov cestnega prometa na okolje, primerne za modeliranje in spremljanje z daljinskim zaznavanjem. Zaradi dobre tehnične določljivosti in velikega nabora zahtevanih spremenljivk je študija osredotočena na modeliranje ravni jakosti zvoka. Analizirane so metode ročnega, polsamodejnega in/ali samodejnega določevanja spremenljivk (strukturne oblike, reliefna izoblikovanost in lomne linije terena ter zvočna impedanca tal) ter podane smernice za pričakovane natančnosti in smiselnost njihovega posodabljanja z daljinskim zaznavanjem. Ravni jakosti zvoka, izračunane z različno pridobljenimi prostorskimi podatki, izkazujejo pomembne razlike, prav tako je velika časovna spremenljivost ravni zvoka; za študijsko območje (AC odsek med Brezovico pri Ljubljani in Dragomerom) so največje razlike glede na letna povprečja med januarskimi (-2 dB(A)) in julijskimi (+2,4 dB(A)) nočnimi ravnmi v dela prostih dneh. Na podlagi študije vpliva hrupa na ljudi je osnovana in preizkušena metoda pretvorbe ugotovljene prostorske razmestitve vpliva hrupa na kilometrske cestne odseke, kar omogoča dinamično določanje cestnine.

## Bibliographic-documental information and abstract

UDC	528.8:656.1.03(043.3)
Author	Žiga Kokalj
Supervisor	associate professor Krištof Oštir, Ph.D.
Title	Modelling dynamic road pricing variables with remote sensing
Notes	197 p., 32 tab., 114 fig., 22 equ., 4 app.
Key words	road pricing, transportation, external costs of transport, environmental noise modelling, airborne laser scanning, remote sensing

### Abstract

The thesis presents a dynamic road pricing model and defines variables of road transport impacts on the environment that are appropriate for modelling and monitoring with remote sensing. The study is focused on environmental noise modelling, because its variables are numerous and well defined. Manual, semiautomatic and automatic methods for defining the parameters (structural forms, relief morphology and break lines, and acoustic impedance of ground) are indicated and tested, and guidelines of their expected accuracies and reasonableness to monitor with remote sensing are presented. Environmental sound power levels, calculated with spatial data of different sources, reveal important differences. Temporal variability in noise levels is also high; the difference is largest between January and July work-free days at night, ranging -2 dB(A) and +2.4 dB(A) respectively. A method to transform ascertained spatial distribution of noise impacts on the environment to a kilometre road segments, based on the study of noise impacts on humans, is tested. This enables determination of a dynamic toll.

## Zahvala

Brez prijaznosti posameznikov in naklonjenosti različnih ustanov moje delo ne bi bilo mogoče, zato se na tem mestu zahvaljujem vsem, ki so mi pri njem kadarkoli pomagali.

Posebej se želim zahvaliti mentorju, dr. Krištofu Oštirju, ki me je vseskozi usmerjal, vzpodbujal in poskrbel, da so bili trenutki neodločenosti karseda kratki.

Hvala vsem sodelavcem na Inštitutu za antropološke in prostorske študije za kreativno in spodbudno delovno vzdušje ter da je služba mnogo več kot le delo. Posebej se zahvaljujem dr. Tatjani Veljanovski, ki je delo pregledala in dala koristne nasvete, kako bi bilo še bolj razumljivo, in dr. Klemenu Zakšku, ki mi je vedno v strokovno pomoč.

V času podiplomskega študija so me finančno podprle in gostile naslednje ustanove in inštitucije: Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo, Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti, Univerza v Birminghamu, Univerza Franche-Comté v Besançonu, Evropski inštitut ModelTER, Evropska komisija in Javni sklad Ad futura.

Zahvaljujem se vsem, ki so mi omogočili dostop do programske opreme in v raziskovalne namene odstopili svoje podatke, zlasti podjetjema Flycom in PNZ ter mag. Andreju Koblerju in Matjažu Sprogarju. Mihi Zupančiču in Dubravku Lovrečiču se zahvaljujem za spoznavanje z zakonitostmi širjenja zvoka in izračune zvočnih ravni. Hvala članom komisije za pregled disertacije in komentarje, kako izboljšati nalogo.

Hvala dr. Dragu Kladniku, ki me je navdušil za znanost in Primožu Pipanu, ki je na nočnih sprehodih z menoj delil misli.

Hvala staršem za podporo tekom vsega študija ter Marku in Tatjani za prijetno zatočišče.

Največja zahvala pa gre družini, ki me je vzpodbujala, verjela vame in mi sledila na preštevilnih poteh. Draga Anja, Gaja in Neža, hvala za vse dni, ko sem lahko v miru »pisal knjigo«.

Žiga Kokalj

Ljubljana, januarja 2010

## Kazalo vsebine

1	UVOD	1
1.1	Ozadje problema	1
1.2	Raziskovalna hipoteza, metode in cilji disertacije	2
1.2.1.	Raziskovalna hipoteza in utemeljitev	2
1.2.2.	Metoda dela	4
1.2.3.	Cilji	4
1.2.4.	Stroškovna učinkovitost daljinskega zaznavanja	5
1.3	Zgradba doktorske disertacije	6
2	ZASNOVA MODELA DINAMIČNEGA CESTNINJENJA	9
2.1	Opredelitev ključnih pojmov in konceptov	9
2.2	Vloga in oris obstoječih raziskav	12
2.2.1.	Dokumenti in usmeritve EU pri zaračunavanju cestnine	13
2.2.2.	Pregled obstoječih pristopov dinamičnega cestninjenja in izdelava modela	14
2.3	Dejavniki vplivov cestnega prometa na okolje	18
2.4	Izbor spremenljivk	23
3	OSNOVE MODELIRANJA RAVNI ZVOKA	25
3.1	Francoska metoda NMPB oziroma standard XP S 31-133	28
3.2	Metoda Harmonoise	29
3.3	Določitev mreže točk sprejemnikov	30
4	MODELIRANJE IZBRANIH SPREMENLJIVK	35
4.1	Študijsko območje in uporabljeni podatki	35
4.1.1.	Snemanje študijskega območja	39
4.2	Reliefna izoblikovanost	41
4.2.1.	Obdelava podatkov zračnega laserskega skeniranja	47
4.3	Lomne linije terena	60
4.4	Sredinska linija ceste	67
4.5	Stavbe	69
4.6	Protihrupne pregrade in zadrževalni zidovi	77
4.7	Akustična (zvočna) impedanca tal	85
4.7.1.	Klasifikacija na podlagi podatkov laserskega skeniranja	90
4.7.2.	Pikselska klasifikacija satelitskih posnetkov Landsat	104
4.7.3.	Objektna klasifikacija ortofoto posnetkov	110
4.7.4.	Karta dejanske rabe zemljišč MKGP	114
4.7.5.	Karta pokrovnosti Corine	122
4.7.6.	Povzetek izdelave impedančnih kart iz podatkov daljinskega zaznavanja	123
4.8	Podnebni podatki	125
4.9	Ostali podatki	132



4.9.1.	Štetje prometa in hitrosti	132
4.9.2.	Vrsta rabe stavb	136
4.9.3.	Število prebivalcev na bivalno enoto	136
5	IZRAČUNI RAVNI ZVOKA	137
5.1	Primerjava emisijskih ravni zvoka	138
5.2	Primerjava ravni zvoka v okolju ob upoštevanju različnih vhodnih podatkov	139
5.3	Izračunane ravni zvoka za celotno študijsko območje	149
6	VPLIV HRUPA NA LJUDI IN PREOBLIKOVANJE PLOSKOVNIH PROSTORSKIH PODATKOV NA LINIJO	155
6.1	Vpliv hrupa na ljudi	156
6.2	Kartiranje vpliva hrupa	159
6.3	Preoblikovanje ploskovnih prostorskih podatkov na linijo	161
6.4	Študija na primeru strateške karte hrupa na odseku med Brezovico in Logatcem	166
7	ZAKLJUČEK	171
8	POVZETEK	177
9	SUMMARY	179
10	LITERATURA IN VIRI	181
11	PRILOGE	197

## Seznam preglednic

Preglednica 1: Snemalni parametri uporabljenih lidarskih podatkov. ....	40
Preglednica 2: Nekateri tehnični metapodatki lidarskih podatkov ožjega študijskega območja O2.....	40
Preglednica 3: Zahtevana natančnost modela višin za modeliranje širjenja zvoka z metodo Harmonoise (Van Maercke 2007, 44). ....	41
Preglednica 4: Statistični rezultati primerjave stereo modelov višin z višinskimi podatki lidarja na golih območjih (prsti in jezera); napake pri 68 % (LE68) in 90 % (LE90) stopnji zanesljivosti (Toutin 2004, 2128). ....	43
Preglednica 5: Uporabnost daljinskega zaznavanja za izdelavo modela višin. ....	45
Preglednica 6: Časovna primerjava obdelav z različnimi nastavitvami. ....	56
Preglednica 7: Zahtevana natančnost modela cestne infrastrukture (Van Maercke 2007, 49). ....	67
Preglednica 8: Zahtevana natančnost modela stavb (Van Maercke 2007, 58; ). ....	69
Preglednica 9: Primerjava višin stavb. ....	74
Preglednica 10: Smiselnost uporabe daljinskega zaznavanja za izdelavo modela stavb. ....	76
Preglednica 11: Zahtevana natančnost modela stavb (Van Maercke 2007, 64). ....	78
Preglednica 12: Vzdolžni in prečni profil protihrupne pregrade glede na smer in vpadni kot laserskega žarka ter gostoto snemanja. Modra puščica nakazuje smer leta helikopterja, črne črte projekcije laserskega žarka, oranžna črta usmerjenost ovire, modri poligon pa lokacijo prečnega profila. Zaradi mehanizma snemanja (vrteče večkotno zrcalo) so projekcije žarka vzporedne. Oba profila sta širine 3 m. ....	83
Preglednica 13: Smiselnost uporabe daljinskega zaznavanja za izdelavo modela protihrupnih pregrad.....	84
Preglednica 14: Zahtevana natančnost impedančne karte (Van Maercke 2007, 46). ....	88
Preglednica 15: Razredi akustične impedance tal (Kragh et al. 2006, 23; Sohlman et al. 2004, 38; Chiari et al. 2007, 37-38). ....	88
Preglednica 16: Razredi akustične impedance tal za različne kategorije rabe tal (prirejeno po Sohlman et al. 2004, 39-40). ....	89
Preglednica 17: Primerjava statistik rastrske podobe intenzitete pred in po normalizaciji.....	93
Preglednica 18: Primerjava statistik intenzitete posameznih preletnih linij iz rastrskih podatkov za ožje študijsko območje.....	94
Preglednica 19: Primerjava statistik intenzitete odbojev s prehitevalnega in voznega pasu avtoceste posameznih preletnih linij iz oblaka točk za ožje študijsko območje. ....	94
Preglednica 20: Pretvorba kategorij pokrovnosti* pridobljenih iz lidarskih podatkov v razrede akustične impedance.....	101
Preglednica 21: Pretvorba kategorij pokrovnosti pridobljenih iz lidarskih podatkov v razrede akustične impedance.....	110

Preglednica 22: Kategorije, ki jih lahko upoštevamo pri klasifikaciji ortofoto posnetkov z namenom izdelave karte akustične impedance.....	113
Preglednica 23: Pretvorba kategorij rabe tal karte Dejanske rabe zemljišč MKGP v razrede zvočne impedance.116	
Preglednica 24: Smiselnost uporabe daljinskega zaznavanja za izdelavo kart pokrovnosti, ki jih lahko prevedemo v karte zvočne impedančne.....	124
Preglednica 25: Ocena natančnosti maske oblakov pridobljene iz podatkov senzorja AVHRR, kot primerjava s podatki satelita Calipso in masko oblačnosti senzorja MODIS (Thoss 2009, 24).....	132
Preglednica 26: Nekatere pomembnejše nastavitve računanja ravni zvoka. ....	138
Preglednica 27: Preizkusne situacije za različne vhodne podatke in opisne statistike razlik v jakosti zvoka glede na referenčni izračun. ....	142
Preglednica 28: Mejne in kritične vrednosti kazalnikov hrupa $L_{noč}$ in $L_{DfN}$ za posamezne stopnje varstva pred hrupom. (UL RS 105/2005).....	160
Preglednica 29: Število stavb, naseljenih stavb in prebivalcev glede na presežene mejne in kritične vrednosti ravni zvoka za tretjo stopnjo varstva pred hrupom, za različna obdobja po kilometrskih odsekih. A, B, C in D prikazuje slika 97.....	164
Preglednica 30: Število stavb, naseljenih stavb in prebivalcev glede na presežene mejne in kritične vrednosti ravni zvoka za tretjo stopnjo varstva pred hrupom, za različna obdobja, po kilometrskih odsekih. Ravni zvoka so privzete iz strateške karte hrupa za obremenjene cestne odseke, izračunane iz prometnih podatkov za leto 2006, za avtocestni odsek med Brezovico in Logatcem. Števila za mejne vrednosti vsebujejo tudi kritične vrednosti.....	167
Preglednica 31: Nekatere kategorije dejavnikov vpliva cestnega prometa na okolje in smiselna obdobja posodabljanja.....	172
Preglednica 32: Spremenljivke, pomembne za izračun ravni zvoka, glede na smiselna obdobja posodabljanja.173	

## Seznam slik

Slika 1: Trojnost cestninjenja. ....	1
Slika 2: Model dinamičnega cestninjenja (prirejeno po Kulauzović et al. 2005). ....	17
Slika 3: Shematičen prikaz geometrijskega širjenja zvoka za točkovni (levo) in linijski vir (desno). ....	26
Slika 4: Razmik med točkami mreže sprejemnikov kot funkcija razdalje za različne vrednosti za največje spremembe ravni hrupa 1 dB(A), 2 dB(A) in 5 dB(A) med točkami mreže (Chiari et al. 2007, 47). ....	31
Slika 5: Prostorsko spremenljiva mreža sprejemnikov za računanje hrupa. Na sliki so točke, ki potekajo pravokotno na cestišče, nameščene do razdalje 100 m, medtem ko so bile pri izračunu oddaljene do 200 m. ....	32
Slika 6: Sprejemnike, ki so ležali znotraj oboda stavb sem odstranil (rdeči točki). Preostalim (rumene točke) sem višino določil s povprečno vrednostjo v vplivnem območju polmera 2 m (modro) ter se na ta način izognil krajevnim popačenjem izofon. Sprejemniki ob stavbah (zeleno) so bili dodani v programu za računanje jakosti zvoka. ....	33
Slika 7: Lokacija študijskega območja. ....	36
Slika 8: Reliefna izoblikovanost študijskega območja (levo) in posnetek ortofoto (desno). Z modrima pravokotnikoma sta označeni ožji preizkusni območji, z oranžnim preizkusno območje za filtriranje lidarskih podatkov. Z oranžnim pasom je nakazan potek snemanja AC Vrhnika – Brezovica, z rdečima Brezovica z okolico 1. Snemanje Brezovica z okolico 2 zajema celotno študijsko območje. ....	37
Slika 9: Diagram spremenljivk, ki jih potrebujemo pri modeliranju širjenja zvoka, ter podatkov in metod, ki sem jih uporabil oz. preizkusil za njihovo ugotavljanje. Podatkovni viri so navedeni v prilogi A. ....	38
Slika 10: Gostota odbojev (št. točk na m <sup>2</sup> ) na delu ožjega študijskega območja. Slika vseh odbojev (levo; maks. 643), prvih (na sredini; maks. 205) in vmesnih odbojev (desno; maks. 146). Slika edinih odbojev (maks. 501) je zelo podobna sliki vseh odbojev, slika zadnjih (maks. 175) pa sliki prvih. ....	40
Slika 11: Delovanje algoritma REIN. Iz oblaka točk (A) v prvi fazi odstrani vse točke, ki ležijo pod terenom in večino odbojev nad terenom (B). V naslednji fazi iz preostalih točk iterativno izdeluje TIN iz vsakega naključno izbranega vzorca. Na ta način dobimo niz naključnih modelov višin in za vsakega izračunamo oceno višine terena na lokaciji piksla (C). Končne višine terena so določene s prišetjem povprečnega odmika spodnjim mejam distribucij višin (D) (prirejeno po Kobler et al. 2007). ....	49
Slika 12: Letalski ortofoto posnetek v ločljivosti 0,25 m (levo, GURS) in senčen model površja rastriranega oblaka vseh laserskih točk (največja višina v celici) s popravljenimi obodi stavb (desno), ki prikazujeta del območja na katerem sem preizkušal algoritme filtriranja. ....	50
Slika 13: Višine (levo) in normiran model površja (desno) istega območja, kot ga prikazuje slika 12. ....	50
Slika 14: Ortofoto posnetek ločljivosti 0,25 m (GURS) (A), oblak točk vseh edinih (črne točke) in zadnjih odbojev (rdeče točke) istega območja (3,24 milijona točk na območju 600 m krat 400 m) (B), oblak točk, zredčen z enovito celično mrežo (0,33 m) (1,15 milijona točk, povprečno 4,8 točke/m <sup>2</sup> ) (C) in oblak točk talnih odbojev, rezultat prve stopnje filtriranja (z goščenjem mreže neenakih trikotnikov) (2,13 milijona točk) (D). Na delu slike B je dobro viden pas zgoščenih točk, kjer je redčenje z enovito celično mrežo najbolj izrazito (C). ....	51

Slika 15: Senčen relief, izdelan z REIN z različnimi nastavitvami iz oblaka točk zadnjih in edinih odbojev. Vsi modeli imajo ločljivost 0,5 m. ....	52
Slika 16: Senčen prikaz reliefa, izdelanega z REIN z različnimi nastavitvami, iz oblaka točk, zredčenega z enovito celično mrežo (dolžina stranice kvadrata 0,33 m). ....	53
Slika 17: Prikaz delovanja algoritma goščenja TIN. Začetni (A) in končni (D) korak ter dve vmesni stopnji (B, C). Vijolične točke so talni odboji, rdeče črte pa povezave med njimi (TIN) (Axelsson 2000; slike prirejene po Soinen 2004).....	54
Slika 18: Senčen relief, izdelan z REIN iz oblaka točk, filtriranega z goščenjem mreže neenakih trikotnikov, brez dodatnega filtriranja (levo) ter prikaz neposredno rastriranega enakega oblaka točk (najmanjša vrednost v celici, interpolacija praznih celic) (desno). ....	55
Slika 19: Odstranitev grobih napak, ki so posledica gostega smrekovega nasada, lepo vidnega na ortofoto posnetku (A). V gostem smrečju laserski žarek ne doseže tal, kljub gostoti 15,5 točke/m <sup>2</sup> . Grobe napake modela reliefa sem na vsem območju proučevanja ročno označil (B) in jih nadomestil z reliefom, izdelanim iz predhodno filtriranega oblaka točka (z ATIN) in dodatnim, razmeroma agresivnim, filtriranjem z REIN (polmer 12 m, kot 50°, število TIN 25) (C). Sloja sem kombiniral z zveznim prehodom na območju prekrivanja, zato prehodi med njima niso opazni (D). Na ortofoto posnetku (0,25 m, GURS) je označena lokacija profila, ki ga prikazuje slika 20.....	57
Slika 20: Profil dolžine 35 m na katerem je v levem delu lepo vidno pomanjkanje talnih odbojev, kljub širini profila 5 m in povprečni gostoti 15,5 točke/m <sup>2</sup> . Oblike krošenj so dobro razpoznavne, prav tako lokacija gozdne ceste. ....	58
Slika 21: Posploševanje plastnic. Na levi sliki so točke plastnic izdelane iz zglajenega 0,5 m lidarskega reliefa (črno) ter točke in plastnice po opravljenem posploševanju z algoritmom odstranjevanja točk (Douglas-Peucker) z največjim dovoljenim odklonom 0,05 m (oranžno). Na desni sliki so slednjim dodane točke in plastnice njihovega posploševanja z algoritmom poenostavljanja krivulj (Wang-Muller) z dolžino linije referenčne krivulje 5 m (modro).....	59
Slika 22: Princip najmanjšega odklona za ugotavljanje nove talne točke (levo) in primer segmentiranega terena (desno) (Nota et al. 2005, B1). ....	60
Slika 23: Kombinacija rastrskih slojev za pomoč pri vizualni interpretaciji lomnih linij (levo) in lomne linije (desno). Pri modeliranju širjenja zvoka so najpomembnejše lomne linije na izbočenih robovih v smeri proti opazovani cestni infrastrukturi (temno zeleno) in tiste, ki opisujejo zgradbo cestnega telesa (rdeče in oranžno).....	61
Slika 24: Navpična ukrivljenost reliefa. Prikazana je različica modela višin, pri kateri nadvoz čez avtocesto še ni bil odstranjen. ....	62
Slika 25: Delež vidnega neba, izračunan na razdalji 5 m v 8 smereh. Črtkan pravokotnik označuje lokacije naslednjih slik. ....	63
Slika 26: Primerjava podob deleža vidnega neba izračunanega na razdalji 5 m v 32 smereh iz modelov reliefa različne ločljivosti: od leve proti desni 0,5 m, 1, m in 2m.....	64
Slika 27: Primerjava podob deleža vidnega neba izračunanega z različnimi nastavitvami. ....	64
Slika 28: Primerjava podob deleža vidnega neba izračunanega na razdalji 5 m v 32 smereh in prikazanega z različnim raztegom histograma.....	65

Slika 29: Prostorska razmestitev oddaljenosti sredinske linije voznega pasu, zajete s 25 cm ortofoto posnetka, od linije ceste iz Zbirnega katastra gospodarske javne infrastrukture. ....	68
Slika 30: Prostorska razmestitev razlik v višinah med 12,5 m reliefom modela GURS in lidarskim reliefom na samodejno določenih točkah vzdolž sredinske linije voznega pasu. ....	68
Slika 31: Primer algoritma za računanje določenega odstotka lokalnih vrednosti v okolju ArcGIS. [R] je raster oštevilčenih mask objektov, [D] je model višin s celimi števili (enota cm). ....	72
Slika 32: Ročno popravljene obode stavb iz katastra stavb. Barvni pasovi označujejo piksele z deležem najnižjih višin terena pod stavbo. Pas z višjim deležem vsebuje tudi pasove z nižjimi deleži. ....	72
Slika 33: Ročno popravljene obode stavb iz katastra stavb. Barvni pasovi označujejo piksele z deležem najvišjih višin stavb. Pas z višjim deležem vsebuje tudi pasove z nižjimi deleži. ....	72
Slika 34: Ročno popravljene obode stavb iz katastra stavb (rdeče), obode stavb, pridobljeni iz lidarskih podatkov (oranžno) in iz njih določene kape stavb (modro). Temno modra območja so bila uporabljena pri izračunu višine kape. ....	73
Slika 35: Primerjalni intervalni grafikoni višin stavb. Odebeljena rdeča črta označuje povprečje, črna mediano. ....	74
Slika 36: Grafikon odvisnosti razlike med višino kape in višino slemena stavb od njihove površine. Razpon vrednosti je zaradi majhnega števila enot zmanjšan desno in zgoraj. ....	75
Slika 37: Rekonstrukcija oblike pregrade iz podatkov o bazi in višini s predpostavljeno linearno interpolacijo višine (levo) ali višino do zgornjega roba (desno). ....	78
Slika 38: Slike intenzitete z nakazanimi protihrupnima pregradama (črtkano blede rdeče). Južna pregrada na sliki desno odstopa od slike intenzitete, ker je pregrada nagnjena in vrh slabše odbija infrardeči laserski žarek od spodnjega dela, kar je ravno obratno, kot na sliki levo. Slika 39 prikazuje trirazsežni pogled obeh območij. ....	80
Slika 39: Trirazsežni prikaz oblakov točk v smeri avtoceste od zahoda proti vzhodu. Svetlost prikazuje intenziteto. Zaradi odboja z višjih plasti je njena vrednost pod rastjem zmanjšana, kot je razvidno s sredine desne ograde na spodnjem območju. Prikazani sta isti območji kot na prejšnji sliki. ....	80
Slika 40: Lokacija profilov naslednje slike. Barve označujejo nadmorske višine. ....	81
Slika 41: Profil dolžine 48,5 m prečno na avtocesto (zgoraj) in profil dolžine 45 m vzdolž protihrupne pregrade (spodaj). Oba prikazujeta oblak točk v pasu širine 3 m. Metrični parametri pregrad so iz profilov ročno dobro določljivi. Na profilu vzdolž pregrade je opaziti tudi njeno dvojno zgradbo, spodaj polno, zgoraj v kombinaciji s prozornimi ploščami. Dvojna »črta« pod pregrado je posledica različne višine terena pred in za njo. Gostota snemanja je 52,9 točke na m <sup>2</sup> (kombinacija šestih snemalnih pasov s po 3,2, 3,5, 3,9, 5,5, 17,6 in 19,2 točke/m <sup>2</sup> ). ....	82
Slika 42: Profil širine 3 m in dolžine 25 m prečno na avtocesto. Z dovolj veliko gostoto snemanja je protihrupna pregrada dobro razločna tudi pod rastjem. Gostota snemanja je 44,3 točke na m <sup>2</sup> (kombinacija petih snemalnih pasov s po 4,8, 5,5, 5,7, 6,3 in 23,0 točke/m <sup>2</sup> ). ....	82
Slika 43: Trirazsežni oblak točk stičišča avtocest posnetega z laserskim sistemom nameščenim na avtomobil. Svetlost prikazuje intenziteto (Ambercore 2008). ....	84
Slika 44: Poenostavljen prikaz procesa izdelave impedančne karte iz podatkov daljinskega zaznavanja. ....	87

Slika 45: Ločevanje stavb in dreves z različnimi mejami standardnega odklona višin odbojev: 0,25 (levo); 0,35 (na sredini); 0,40 (desno).....	91
Slika 46: Rastrska podoba intenzitete pred (levo) in po (desno) normalizaciji (ožje študijsko območje O2). ....	93
Slika 47: Podatki popravljene intenzitete območij z relativno višino nižjo od 2 m klasificirani z nadzorovano pikselo klasifikacijo. Izsek prikazuje del avtoceste. Napačna klasifikacija odstavnih pasov je dobro vidna. ....	98
Slika 48: Različni načini filtriranja. Slika brez filtriranja (A), izločevanje posamičnih pikslov in nadomeščanje njihovih vrednosti s filtri večine (metoda osmih sosedov (B), metoda štirih sosedov (C)), izločevanje skupin pikslov manjših od tri in nadomeščanje njihovih vrednosti s filtri večine (metoda osmih sosedov (D), metoda štirih sosedov (E)), filtriranje celotne slike s filtrom večine velikosti tri krat tri (F). V izogib težavam pri filtriranju robov so slike izrezi večjih podob (Kokalj 2004, 32). Označene so zanimivejše spremembe. ....	99
Slika 49: Stopnje in parametri filtriranja razreda stavb klasifikacije lidarskih podatkov. ....	100
Slika 50: Stopnje in parametri filtriranja razreda gozd klasifikacije lidarskih podatkov. ....	101
Slika 51: Stopnje in parametri filtriranja združenih razredov klasifikacije lidarskih podatkov. ....	102
Slika 52: Izsek karte pokrovnosti, izdelane iz lidarskih podatkov. ....	103
Slika 53: Izsek karte akustične impedance izdelane iz lidarskih podatkov in izražene z impedančnim koeficientom G. ....	103
Slika 54: Odločitveno drevo omejevanja kategorij z višino in nagibom. ....	106
Slika 55: Izsek iz karte pokrovnosti izdelane s klasifikacijo posnetka Landsat. Na desni sliki je prikazano celotno študijsko območje. V legendi so le kategorije, prikazane na tem delu karte. ....	107
Slika 56: Posploševanje rastrskih podatkov, pretvorjenih v vektor, med samo pretvorbo (modro) in z algoritmom Wang-Muller (zeleno). ....	108
Slika 57: Posploševanje rastrskih podatkov, pretvorjenih v vektorje, z Bezierjevimi krivuljami (levo) in B-zlepki (desno). ....	108
Slika 58: Izsek karte akustične impedance izdelane s klasifikacijo satelitskih posnetkov Landsat in izražene z impedančnim koeficientom G. ....	109
Slika 59: Izenačevanje histograma. ....	111
Slika 60: Postopek izdelave karte pokrovnosti z objektno klasifikacijo ortofoto posnetkov. ....	111
Slika 61: Izsek karte pokrovnosti, izdelane z objektno klasifikacijo letalskih ortofoto posnetkov. ....	113
Slika 62: Izsek karte akustične impedance izdelane z objektno klasifikacijo letalskih ortofoto posnetkov in izražene z impedančnim koeficientom G. ....	113
Slika 63: Izsek iz karte dejanske rabe zemljišč MKGP. Na sliki je enako območje kot ga prikazuje slika 55. V legendi so prikazane le kategorije, ki se jih da razbrati s tega dela karte. ....	115
Slika 64: Vizualna primerjava algoritmov za posploševanje poligonov – izseka testnega območja. Prvotna karta dejanskih zemljišč MKGP je prikazana v sivinski lestvici, robovi so označeni temno sivo. Posplošitev z algoritmom Douglas-Peucker je prikazana oranžno, z algoritmom Weighted Visvalingham-Whyatt pa modro. ....	118

Slika 65: Postopek posploševanja karte dejanske rabe zemljišč MKGP v karto akustične impedance. ....	119
Slika 66: Deli poligonov, ožji od 5 m, so bili odstranjeni s spajanjem (desno), pri čemer je bilo treba, zaradi načina delovanja algoritma, zagotoviti vozlišča, ki so po diagonali bliže kot 5 m. To sem storil z razdelitvijo robov poligonov s 3,5 m mrežo. ....	119
Slika 67: Izseka karte akustične impedance izdelane iz karte dejanske rabe zemljišč MKGP v različnih korakih posploševanja. Levi stolpec prikazuje območje pozidave, desni pa pretežno kmetijska zemljišča z vmesnimi potmi (tanjšimi poligoni). V prvem koraku posploševanja so bile kategorije rabe tal preklasificirane v impedančne kategorije; kategoriji G so bile dodane stavbe (A, B). V drugem in tretjem koraku je bilo izvedeno iterativno spajanje in odstranjevanje delov poligonov z manj kot 5 m širino, najprej znotraj ene kategorije (C, D), nato še med več kategorijami (E, F). V zadnjem koraku je sledilo posploševanje z algoritmom Wang-Muller (G, H). ....	120
Slika 68: Izsek karte akustične impedance izdelane iz karte dejanske rabe zemljišč MKGP in izražene z impedančnim koeficientom G. ....	121
Slika 69: Izsek iz karte pokrovnosti Corine. Na sliki levo je enako območje kot ga prikazuje Slika 55, na sliki desno je prikazano celotno študijsko območje. V legendi so prikazane le kategorije, ki se jih da razbrati s tega dela karte. ....	123
Slika 70: Karta akustične impedance izdelana iz karte pokrovnosti Corine in izražena z impedančnim koeficientom G. ....	123
Slika 71: Uklon poti zvočnega valovanja v normalnih atmosferskih pogojih in pri širjenju zvoka v smeri proti vetru (neugodne razmere za širjenje zvoka) (levo) ter pri temperaturni inverziji in pri širjenju v smeri vetra (ugodne razmere za širjenje zvoka) (desno) (prirejeno po NPL 2007, A11-13). ....	127
Slika 72: Intervalni grafikon hitrosti lahkih vozil čez dan, zvečer in ponoči za podatke celega leta. Odebeljena rdeča črta označuje povprečje, črna mediano. Izračuni potrjujejo, da lahko pri računanju povprečnega letnega hrupa na izbranem odseku privzamemo administrativno omejitev hitrosti za lahka vozila (130 km/h), kot privzeto vrednost za vsa tri časovna obdobja, brez pomembnih napak v izračunu jakosti zvoka (poglavje 5.1). ....	134
Slika 73: Intervalni grafikon povprečnih mesečnih hitrosti lahkih vozil čez dan, zvečer in ponoči za povprečen delavnik (levo) in dela prost dan (desno). Odebeljena rdeča črta označuje povprečje, črna mediano. ....	134
Slika 74: Grafikon povprečnih mesečnih hitrosti vozil. ....	135
Slika 75: Grafikon povprečnega števila vozil v delavniku. ....	135
Slika 76: Grafikon povprečnega števila vozil na dela prost dan. ....	135
Slika 77: Grafi primerjave emisijskih ravni zvoka. Na abscisi so prikazane mesečne ekvivalentne jakosti zvoka vira ob upoštevanju dejanskih povprečnih hitrostih vozil in na ordinati ob upoštevanju zakonsko predpisanih omejitev. Vrednosti za dela proste dni so prikazane s temno modro, za delavnike pa s svetlo modro barvo (številke označujejo mesece). V mesecih tople polovice leta so emisije višje... ....	139
Slika 78: Intervalni grafikon mesečnih razlik jakosti zvoka vira ob upoštevanju dejanskih povprečnih hitrosti ali administrativne omejitve. Razlike so največje ponoči, vendar so v splošnem zelo majhne. ....	139
Slika 79: Karta ravni jakosti zvoka za referenčni izračun. Tanke rjave črte so metrske lidarske plastnice. ....	141



Slika 80: Raztreseni grafikoni primerjave referenčnega izračuna ravni zvoka in izračunov z različnimi podatki o stavbah. Temna črta je linearna regresijska premica .....	143
Slika 81: Raztreseni grafikoni primerjave izračuna glasnosti zvoka pri različno pridobljenih obodih stavb. Na abscisi so izračunane glasnosti zvoka ob upoštevanju ročno popravljenega katastra, na ordinati pa ob upoštevanju (pol)samodejno pridobljenih obodov iz podatkov laserskega skeniranja. V obeh primerih so upoštewane višine kapi stavb. Temna črta je linearna regresijska premica. ....	144
Slika 82: Primerjava izračunov jakosti zvoka glede na oddaljenost od vira.....	144
Slika 83: Raztreseni grafikoni primerjave referenčnega izračuna ravni zvoka in izračunov z različnimi podatki o zvočni impedanci tal. Temna črta je linearna regresijska premica .....	145
Slika 84: Raztreseni grafikoni primerjave referenčnega izračuna ravni zvoka ter izračunov z upoštevanimi lomnimi linijami reliefa in protihrupnimi pregradami. Temna črta je linearna regresijska premica .	146
Slika 85: Karta razlik v ravni jakosti zvoka med referenčnim izračunom in izračunom z upoštevanimi protihrupnimi pregradami.....	147
Slika 86: Raztreseni grafikoni primerjave referenčnega izračuna ravni zvoka in izračuna s sprejemniki na 4 m višine ter izračuna z upoštevanimi podatki GURS in MKGP. Temna črta je linearna regresijska premica .....	148
Slika 87: Karta razlik v ravni jakosti zvoka med referenčnim izračunom in izračunom s podatki GURS in upoštevano impedančno karto, izdelano iz karte rabe tal MKGP.....	149
Slika 88: Grafikon povprečnih razlik ravni zvoka za posamezen mesec od letnega povprečja, za vse dni (oranžno), delavnike (svetlo modro) in dela proste dni (temno modro), za vse sprejemnike. Povprečne razlike se nanašajo na povprečja enakega obdobja, na primer, povprečne razlike dela prostih dni v januarju od dela prostih dni v letu. Grafikon torej prikazuje povprečno nihanje ravni zvoka čez leto za celotno študijsko območje. ....	150
Slika 89: Grafikon povprečnih razlik ravni zvoka od srednje vrednosti za posamezno obdobje dneva za delavnike in dela proste dni, po mesecih, za vse sprejemnike (celotno študijsko območje).....	151
Slika 90: Karta kritičnih ravni jakosti zvoka v januarjskih dela prostih dneh, ponoči.....	152
Slika 91: Karta kritičnih ravni jakosti zvoka v julijskih dela prostih dneh, ponoči.....	152
Slika 92: Karta ravni glasnosti zvoka $L_{DIN}$ .....	153
Slika 93: Poenostavljen prikaz procesa pridobitve razredov vpliva posameznih cestnih odsekov.....	155
Slika 94: Poenostavljen model povezave med hrupom in njegovim vplivom v skupnosti (Nelson 1987, cit. po Ouis 2001, 109). ....	157
Slika 95: Posplošen prikaz človekove zaznavnosti spremembe v ravni jakosti zvoka (Bruel in Kjaer 2001, 9).	158
Slika 96: Linearno pojevanje vpliva dolžinskega cestnega odseka z oddaljenostjo od krajne točke odseka, ki jo ponazarja modra pika (odsek, katerega vpliv proučujemo, poteka naravnost, levo od točke) (A) ter pojevanje vpliva glede na kot med pravokotnico na cestišče in točko v prostoru ( $1 - \sin \alpha_0$ ) (B). Kombinacija pojevanja vpliva določenega odseka, kot funkcija razdalje in sinusa kota (C), ter kvadrata razdalje in sinusa kota (D). ....	163

- 
- Slika 97: Naseljene stavbe s preseženimi mejnimi (svetlejši odtenki) in kritičnimi vrednostmi (temnejši odtenki), po odsekih, glede na letoletni kazalnik glasnosti zvoka  $L_{DYN}$  (A), letoletni kazalnik glasnosti zvoka  $L_{noč}$  (B), nočno raven zvoka v delu prostih dni januarja (C) in julija (D). Nenaseljene stavbe in stavbe, na katerih mejne ravni niso presežene, so prikazane svetlo sivo. .... 165
- Slika 98: Grafikon števila naseljenih stavb (zgoraj) in njihovih prebivalcev (spodaj), ki so izpostavljeni mejnim in kritičnim ravnam zvoka po kilometrskih odsekih, za avtocestni odsek med Brezovico in Logatcem. Levo merilo velja z mejne, desno pa za kritične vrednosti. .... 168
- Slika 99: Trije primeri razvrstitve dolžinskih odsekov cestninske ceste med Brezovico in Logatcem v razrede vpliva na okolico in posledično vpliva na višino cestnine z vidika parametra hrup. Gre za enega najbolj prometno obremenjenih cestnih odsekov v državi. Modre točke označujejo priključke na avtocesto. .... 169

## Okrajšave in simboli

ATIN	filtriranje oblaka laserskih točk s prilagodljivim goščenjem mreže neenakih trikotnikov (angl. adaptive TIN densification)
DMV 12,5	digitalni model višin Slovenije s prostorsko ločljivostjo 12,5 m, narejen z metodo obteženega seštevanja iz obstoječih zbirk prostorskih podatkov različne kakovosti
DOF5	barvni digitalni ortofoto posnetek s prostorsko ločljivostjo 0,5 m
DTK5	državna topografska karta v merilu 1 : 5000
EU	Evropska zveza
GURS	Geodetska uprava Republike Slovenije
IR	infrardeči
MKGP	Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano
nDMP	normiran digitalni model površja
NMPB	francoska metoda računanja jakosti zvoka »Bruit des infrastructures de transports terrestres«, tudi standard XP S 31-133
REIN	ponavljajoča interpolacija modela višin iz oblaka laserskih točk (angl. repetitive interpolation)
SAR	umetno odprtinski radar (angl. synthetic aperture radar)
SO	standardni odklon
TTN10	temeljni topografski načrt v merilu 1 : 10.000
TTN5	temeljni topografski načrt v merilu 1 : 5000
ZLS	zračno lasersko skeniranje
$d$	razdalja med virom in sprejemnikom
$\Delta d_i$	razdalja med točkama spremembe ravni zvoka
$L_{DVN}$	standardni kazalnik ravni glasnosti zvoka (hrupa) dan-večer-noč; kazalnik hrupa za celovito motnjo
$L_{noč}$	standardni kazalnik nočne ravni glasnosti zvoka (hrupa) (obdobje od 22:00 do 6:00); kazalnik hrupa za motnjo spanca
$L_{dan}$	raven jakosti zvoka za obdobje od 6:00 do 18:00
$L_{večer}$	raven jakosti zvoka za obdobje od 18:00 do 22:00
$L_W$	raven jakosti zvoka vira (emisijska jakost zvoka)
$L_{W,linija}$	povprečna jakost zvoka linijskega vira
$L_{W,0}$	emisija zvoka posameznega vozila
$L_d$	raven jakosti zvoka na razdalji $d$
$f$ in $\nu$	frekvenca
$\lambda$	valovna dolžina
$\rho_{x,y}$	Pearsonov koeficient korelacije
$Z$	zvočna (akustična) impedanca
$Z_0$	specifična zvočna (akustična) impedanca
$\Omega$	prostorski kot poljubnega predmeta z izbranega opazovališča
$l$	dolžina stranice celice, velikost rastrskega piksla
$P$ in $S$	površina

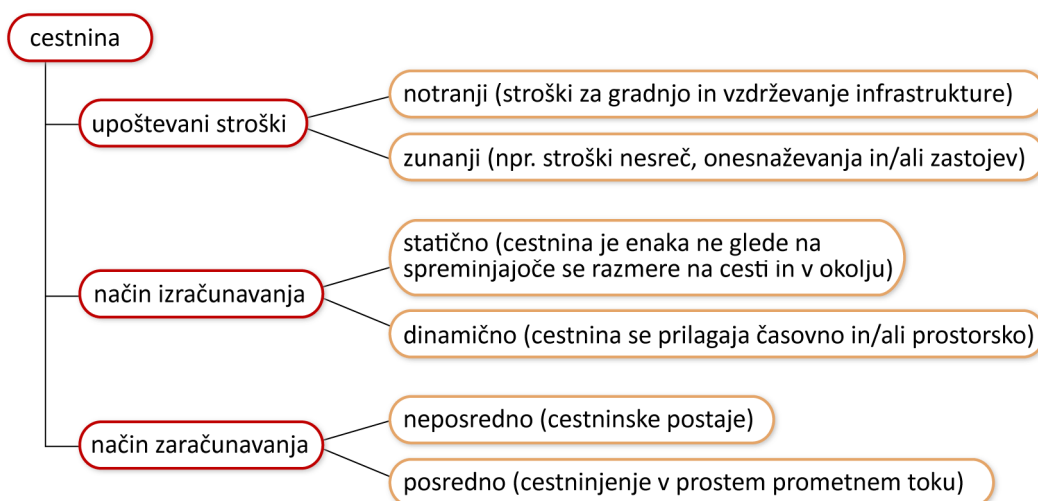


# 1 UVOD

Uvodno poglavje predstavi utemeljitev raziskave, opiše hipoteze in cilje doktorske disertacije ter njeno zasnovo s kratko vsebino poglavij.

## 1.1 Ozadje problema

Vplivi prometa na okolje so raznoliki in večplastni (Lah 2002a), kot pomemben regulator stopnje njihovega učinkovanja pa se v zadnjem času vedno bolj uveljavlja cestninjenje (Ricci in Rainer 1999; Santos et al. 2000). Poznamo statični in dinamični sistem izračunavanja cestnine, ki lahko pri izračunu višine cestnine temeljita na pristopu notranjih ali zunanjih stroškov (slika 1).



Slika 1: Trojnost cestninjenja.

Figure 1: Three views on road pricing.

Ekonomisti so dokazali, da družbeni optimum lahko dosežemo le z dinamičnim modelom cestninjenja, ki upošteva tudi okoljske stroške prevoza (Verhoef 1998; Krajnc 2005). Poudarjajo, da je uvedba takšnega modela v praksi zelo težavna zaradi različnih

neravnovesij, ki obstajajo v narodnem gospodarstvu, vendar hkrati opozarjajo, da je to še vnaprej temeljni primerjalni model, h kateremu je potrebno težiti z ukrepi, ki jih sprejemamo v praksi. Dinamični način so ponekod<sup>1</sup> že vpeljali, vendar zaenkrat le kot instrument časovnega uravnavanja gostote prometnega toka.

Ugotavljanje okoljskih parametrov, od katerih je odvisen učinek cestnega prometa, je pomemben prispevek k opredeljevanju ukrepov, s katerimi je mogoče zmanjšati oziroma ublažiti onesnaževanje ter vzpostaviti temelje za financiranje zaščitnih ukrepov in okoljskih raziskav, ki naj vodijo k izboljšanju stanja, ter novih tehnologij in metod za zmanjšanje negativnih vplivov. Za pridobivanje zveznih podatkov o okolju na večjih območjih se uporablja predvsem daljinsko zaznavanje, zlasti satelitske senzorje. Pri tem imajo posebno vlogo večspektralni senzorji srednje prostorske ločljivosti, nameščeni na primer na satelitih Landsat, SPOT, Envisat, Terra in Aqua. Za določevanje kazalnikov na regionalni in krajevni ravni lahko uporabimo tudi senzorje, nameščene na letalih in helikopterjih, ki zaradi drugačnih razmer snemanja dajejo natančnejše podatke večje ločljivosti, tako prostorske in spektralne kot radiometrične. V zadnjem desetletju sta se uveljavila tudi zračno in terestično lasersko skeniranje (lidar). Prvo nudi najbolj natančne podatke o višinah reliefa in objektov na njem, z drugim pa lahko izdelamo zelo natančne trirazsežne modele predmetov.

## 1.2 Raziskovalna hipoteza, metode in cilji disertacije

### 1.2.1. Raziskovalna hipoteza in utemeljitev

Modeli prostora (modeli kot približki fizične/geografske stvarnosti) po naravi stvari združujejo naravne in družbene dejavnike, ki se povezujejo v neločljivo celoto. Kompleksnost in posebnost tovrstnega modeliranja analitiku nalaga precej širok, interdisciplinaren pristop (Veljanovski 2007, 4-5). Iz tega razloga menim, da je treba prilagoditi način dela v vseh stopnjah izdelave različnih modelov prostorske stvarnosti, pri

---

<sup>1</sup> Na primer Stockholm (Švedska), Santiago de Chile (Čile) in San Diego Interstate 15 (Kalifornija, Združene države Amerike).

tem slediti že uveljavljenim tehnikam prostorskega modeliranja ter se poglobljati v iskanje novih možnosti in pristopov, ki jih ponujajo in omogočajo sodobne tehnologije in sodobni zajem prostorskih podatkov. V luči tega sem se odločil za izpeljavo primera količinskega ocenjevanja prostorskih spremenljivk, potrebnih za določevanje nekaterih parametrov dinamičnega cestninjenja, s tehnologijo in tehnikami daljinskega zaznavanja. Skladno z opisanimi izhodišči sem postavil naslednji hipotezi.

*Z ustrezno izbiro platform in senzorjev ter določitvijo najustreznejših metod daljinskega zaznavanja lahko optimalno zbiramo in modeliramo podatke izbranih okoljskih spremenljivk, ki so potrebne za kakovosten izračun dinamično spremenljive cestnine. Domnevam, da lahko s prilagoditvijo in izboljšanjem obstoječih metod ter z njihovo kombinacijo znatno izboljšamo rezultate.*

Z raziskavami želim tudi preveriti in ovrednotiti smiselnost uporabe daljinskega zaznavanja pri določevanju in spremljanju okoljskih spremenljivk, potrebnih pri modelu prostorsko in časovno spremenljive cestnine.

Predmet raziskave so:

- pregled teoretičnih modelov dinamičnega zaračunavanja cestnine,
- analiza dejavnikov vplivov cestnega prometa na okolje,
- prostorsko modeliranje kazalnikov zunanjih stroškov prevoza,
- projekcija ploskovnih prostorskih podatkov na linijo ter
- izbira platform in senzorjev ter iskanje najustreznejših metod daljinskega zaznavanja za optimalno določevanje izbranih dejavnikov.

Izziv je metodološki, zato je proučevanje usmerjeno na vzorčni primer dejavnika hrup oz. ravni zvoka. Namen raziskave je namreč preizkus metode, ki se lahko z dopolnitvami in vključitvijo še preostalih parametrov v prihodnosti uporabi za določevanje okoljskih spremenljivk, potrebnih pri dinamičnem cestninjenju.

## 1.2.2. Metoda dela

V uvodnem delu disertacije je uporabljena deduktivna metoda, ki jo zaradi aplikacije splošnega znanja na konkretne primere zahtevajo analiza vplivov dejavnikov cestnega prometa na okolje in izbor ustreznih kazalnikov ter ugotavljanje najprimernejšega senzorja daljinskega zaznavanja in metode obdelave. Sledi induktivna metoda, saj je pri opazovanju, identifikaciji in lociranju pojavov že ob samem zbiranju gradiva potreben poglobljen razmislek o posameznih ugotovitvah, zvezah med pojavi, ugotavljanju njihove odvisnosti in usklajevanju s splošnimi, že znanimi zakoni. V poglavjih o modeliranju izbranih spremenljivk, izračunih ravni zvoka in preoblikovanju ploskovnih prostorskih podatkov na linijo se prepletajo metode daljinskega zaznavanja in geografskih informacijskih sistemov ter statistične analize in primerjave. Uporabil sem različne tehnike izdelave modela višin iz podatkov zračnega laserskega skeniranja, vizualizacije morfoloških značilnosti reliefa, segmentacije, objektne in pikselske klasifikacije rastrskih podatkov ter posploševanja vektorskih in rastrskih podatkov.

## 1.2.3. Cilji

Vse večje zahteve prebivalstva po bolj zdravem življenjskem okolju ter posledične usmeritve prometne politike Evropske zveze k vključevanju zunanjih stroškov prevoza v končno višino cestnine izražajo nujnost preoblikovanja obstoječih modelov cestninjenja. Namen raziskave je zato:

- proučiti in povzeti usmeritve prometne politike Evropske zveze pri zaračunavanju cestnine za nacionalni in tranzitni osebni ter tovorni promet;
- izbrati model dinamičnega cestninjenja, ki bo obsegal notranje in zunanje stroške;
- določiti nabor dejavnikov vplivov cestnega prometa na okolje;
- določiti spremenljivke, s katerimi lahko merimo ali ocenjujemo izbrane dejavnike vpliva prometa na okolje, in ovrednotiti smiselnost njihovega spremljanja z daljinskim zaznavanjem;



- zasnovati metodo za ugotavljanje prostorske razmestitve dejavnikov vplivov ter njihove parameterizacije na linijo, kar potencialno omogoča dinamično cestninjenje s polno uveljavitvijo načela »uporabnik plača«.

Glavni cilj raziskave je odgovoriti na naslednja vprašanja:

- Katere kazalnike dejavnikov vpliva cestnega prometa na okolje dinamičnega cestninjenja je mogoče/smiselno spremljati z daljinskim zaznavanjem?
- Kateri so najbolj primerni sistemi ali kombinacije sistemov daljinskega zaznavanja za določevanje kazalnikov?
- Katere so najprimernejše metode določevanja kazalnikov?
- V kakšnem časovnem obdobju je smiselno spremenljivke posodabljati?

Ugotovitve in spoznanja naj bi v praksi pripomogli k lažji, predvsem pa z vidika časa bolj ekonomični izvedbi modela dinamičnega cestninjenja. V znanosti pa lahko vzpostavljeni novi in dopolnjeni postopki ter vrednostne ocene primernosti daljinskega zaznavanja za določevanje kazalnikov, prispevajo k boljši opredelitvi vplivov cestnega prometa na okolje ter k ustrežnejšemu rangiranju v razrede.

#### 1.2.4. Stroškovna učinkovitost daljinskega zaznavanja

Stroškovna učinkovitost daljinskega zaznavanja je v veliki meri odvisna od namena proučevanja, zahtevane prostorske in tematske natančnosti, pogostosti posodabljanja, skupne (večkratne) uporabe podatkov, velikosti območja zanimanja, razdrobljenosti pokrajinskih elementov in same narave pokrajine ter ravni optimizacije in samodejnosti procesov obdelave. Od tega so namreč odvisni štirje glavni viri stroškov, ki nastanejo z njegovo uporabo (Mumby et al. 1999):

- strukturni stroški,
- terenski pregled,
- stroški zajema podatkov in
- stroški obdelave terenskih in daljinsko zaznanih podatkov.

Ker so stroški običajno visoki, morajo biti jasno opredeljeni uporabniki in potrebe po izvedenih informacijah. Še pred desetletjem so strukturni stroški, kot sta nakup strojne in programske opreme, lahko dosegli večji del skupnih stroškov projekta (med polovico in tremi četrtinami), danes so, vsaj strojni del, zaradi napredka v zmogljivosti računalnikov občutno nižji. Če programska in strojna infrastruktura že obstaja, je delež ostalih stroškov močno odvisen od zgoraj omenjenih dejavnikov. Pri kartiranju habitatov, na primer, je terensko pregledovanje nujno potrebno in časovno potratno, zato lahko obsega do 80 % vseh stroškov. V splošnem velja, da več časa in truda vloženega v terensko preverjanje pomeni višjo kakovost končnega izdelka. Izbira platforme in senzorja daljinskega zaznavanja je kompromis med natančnostjo izdelka in ceno. Za študije okoljskih indikatorjev so se kot stroškovno učinkoviti izkazali senzorji na satelitih Landsat in SPOT. Stroškovno učinkovitost letalskega snemanja je težje ovrednotiti, ker je zelo vezana na posamezen primer. Obdelava in analiza podatkov sta običajno dražji od samega zajema.

Posledica navedenega je, da se včasih sredi raziskave sliši vprašanje: »Ali ne bi bilo ceneje zbrati informacij na terenu, z avtomobilom?« Največkrat je odgovor negativen, vendar gospodarnost sem ter tja le ni čisto jasna. Ob tem pa je treba dodati, da so inovacije le stežka vnaprej stroškovno učinkovite, zato so prvi koraki pri uvajanju naprednih tehnologij skorajda zanesljivo dražji kot status quo, čeprav v nadaljevanju ni nujno tako.

### 1.3 Zgradba doktorske disertacije

Zasnova doktorske disertacije je nekoliko nestandardna, saj je zaradi močnega prepletanja ni bilo mogoče ločiti na uveljavljena »standardna« poglavja, temveč sem se temu skušal kolikor mogoče približati. Pregled literature je tako vseskozi prisoten in vpleten v »zgodbo«, zlasti v poglavju o modeliranju spremenljivk pa se v veliki meri povezujejo tudi opis vhodnih podatkov ter vsebinskih in grafičnih zahtev spremenljivk, kontrola kakovosti izvedenih podatkovnih nizov in diskusija ob ugotovljenem.

To poglavje opisuje osnovne razloge za raziskavo, njene cilje in raziskovalna vprašanja. Poglavje 2 opredeli zasnovo modela dinamičnega cestninjenja ter poda ključne spremenljivke in razloge za njihov izbor. Poglavje 3 predstavi osnove modeliranja ravni zvoka v okolju, izbrani metodi njihovega računanja in način določevanja mreže točk

sprejemnikov. Poglavje 4 je osrednje poglavje raziskave, ki razjasni izbrane metode modeliranja posameznih kazalnikov spremenljivk, predstavi in analizira rezultate. Poglavje 5 podaja primerjavo emisijskih ravni zvoka in ravni zvoka v okolju ob upoštevanju različnih vhodnih podatkov ter izračunane ravni zvoka za celotno študijsko območje. V poglavju 6 je opredeljena metoda določevanja vpliva hrupa na okolico in podana metoda preoblikovanja ploskovno podanega vpliva nazaj na linijo. Poglavje 7 povzame ugotovitve in predlagane rešitve ter poda osredotočene odgovore na raziskovalna vprašanja. V prilogah sta seznama uporabljene programske opreme in podatkovnih virov, opisani so kazalnika hrupa  $L_{DVN}$  in  $L_{noč}$  ter Fresnelove cone in prikazane karte razlik v ravneh zvoka.



## 2 ZASNOVA MODELA DINAMIČNEGA CESTNINJENJA

V tem poglavju opredelim ključne pojme in koncepte, na kratko povzamem dokumente in usmeritve Evropske zveze pri zaračunavanju cestnine, podam pregled obstoječih pristopov dinamičnega cestninjenja, koncept modela in pregled dejavnikov vplivov cestnega prometa na okolje. Zasnujem tudi spremenljivke, ki jih je mogoče določevati z daljinskim zaznavanjem in utemeljim ožji izbor tistih, ki so obravnavane v nadaljnjih poglavjih.

### 2.1 Opredelitev ključnih pojmov in konceptov

V nadaljevanju opredeljujem pojme in koncepte notranjih in zunanjih stroškov cestnega prometa, statičnega in dinamičnega sistema izračunavanja cestnine ter vpliva cestninjenja na prometne tokove.

Z ekonomskega stališča (Schmidtchen et al. 2008, 31) so *zunanji vplivi* v splošnem posledica odločitve v procesu povpraševanja in ponudbe, ki jo je sprejel činitelj v nizu povpraševanja, funkcije koristnosti ali proizvodnje, ali drugih ekonomskih činiteljev, ki ne delujejo v okviru sistema cen. Zunanji vplivi so lahko pozitivni ali negativni, t.j. lahko povzročajo korist ali strošek drugim činiteljem in po definiciji niso upoštevani v procesu odločanja. *Notranji vplivi* so njihovo nasprotje, torej tisti vplivi, ki so v procesu odločanja upoštevani. V ekonomiji so zato *zunanji stroški* definirani kot izguba koristi (izraženo v denarju) ali povečanje stroškov proizvodnje činiteljem, na katere odločitev vpliva. Na drugi strani so *zasebni (notranji) stroški*, s katerimi se sooča činitelj, ki odločitev sprejme. *Družbeni stroški* so vsota zasebnih in zunanjih stroškov. Iz navedenega sledi, da za zunanje stroške velja povratna (recipročna) zveza, kar pomeni, da mora za obstoj stroška obstajati ne le povzročitelj temveč tudi »prejemnik« oziroma, da mora obstajati tekmovanje za redko dobrino. Zunanji stroški so torej povzročeni z obeh strani.

Kljub zgornjim navedbam, se je v prometni politiki uveljavilo, da so *notranji prometni stroški* (zasebni prometni stroški) tisti, ki jih v celoti prevzema posamezni uporabnik prometnega sistema (stroške nakupa in vzdrževanja vozila, goriva, taks, davkov, porabljenega časa in podobno). *Zunanji prometni stroški* (eksterni prometni stroški) pa so tisti negativni vplivi prometa na družbo, katerih poravnave ne prevzema uporabnik prometnega sistema, ki jih je povzročil. *Skupni prometni družbeni stroški* so vsota zunanjih in notranjih stroškov (Evropska okoljska agencija 2003). Elvik (1994) zunanje prometne stroške deli na sistemske, fizične in mejne (stroški obsega prometa). Prvi so povzročeni družbi v splošnem, druge povzroča ena skupina uporabnikov prometnega sistema drugi skupini uporabnikov, tretji pa so povzročeni z dodajanjem enega uporabnika k obstoječemu prometnemu sistemu. Slednje izračunavamo na enoto dodanega prometnega dela in so pomembni za izvajanje ponotranjenja zunanjih stroškov in oblikovanja politike cen.

Glede na teorijo blaginje lahko *ponotranjenje (internalizacija) zunanjih stroškov* vodi k učinkovitejši rabi infrastrukture, zmanjšanju negativnih stranskih učinkov prometa in izboljša raven pravičnosti med uporabniki. Ponotranjenje zunanjih stroškov razumemo kot prizadevanje za njihovo vključitev v odločitveni proces uporabnikov. To lahko storimo neposredno z omejitvenimi ukrepi, na primer zapovedmi in nadzorom, ali posredno z vzpostavitvijo finančnih spodbud, to je večinoma tržnimi instrumenti, na primer davki, taksami, subvencijami, ki so usmerjeni v spreminjanje vedenja uporabnikov prometa.

Na podlagi navedenega sta se razvila dva pristopa k izračunavanju cestnine. Pristop upoštevanja notranjih stroškov pri izračunu višine cestnine temelji na načelu povrnitve stroškov, kar pomeni, da upoštevamo zgolj neposredne izdatke za cestno infrastrukturo (gradnja, vzdrževanje, obnavljanje in upravljanje). Drugi pristop, temelječ na teoriji zunanjih družbenih stroškov, poleg neposrednih stroškov same infrastrukture upošteva tudi posredno nastale stroške: prometne nesreče, škode zaradi prometnih zastojev in okoljske škode, kot so na primer krajevno in svetovno onesnaževanje zraka, čezmeren hrup, poškodbe pokrajine (vključno z razvrednoteno vizualno privlačnostjo in drobljenjem habitatov) ter socialni stroški, na primer zdravstveni stroški in posredni stroški nesreč, ki niso vključeni v zavarovanja.

*Za statični sistem izračunavanja cestnine* je značilno, da je cestnina na uporabniški kilometer po celotnem omrežju cestninjenja enaka (*enotna cestnina*), ne glede na to, kdaj uporabnik

uporablja cesto in kateri njen odsek uporablja. Je torej neke vrste plačilo uporabnine oziroma cestna dajatev. Znesek, ki ga mora poravnati uporabnik, se izračuna tako, da se višina cestnine za prevoženi kilometer pomnoži s prevoženo razdaljo. V primeru, da je znesek odvisen tudi od razreda, v katerega spada uporabnikovo vozilo, se znesek pomnoži še s faktorji, ki veljajo za posamezni cestninski razred. Na drugi strani *dinamični sistem izračunavanja* razumemo kot prostorsko in časovno prilagajanje višine cestnine glede na spreminjajoče se parametre cestninjenja (*diferencirana, dinamična cestnina*). S tem se je mogoče prilagajati različnim dejavnikom glede na namen in cilje, ki jih želimo s cestninjenjem doseči (na primer pospeševanje turizma, zmanjšanje prometnih zastojev). V tej disertaciji je za dinamični sistem izračunavanja cestnine uporabljen tudi izraz *dinamično cestninjenje*, ki ga je potrebno ločiti od cestninjenja v prostem prometnem toku. Osnovni koncept tovrstnega izračunavanja cestnine je razmeroma preprost.

Slovar slovenskega knjižnega jezika (SSKJ 1994) opredeljuje *dinamičnost* kot lastnost, značilnost dinamičnega, to je takšnega, ki je poln sile in raznovrstnih sprememb, razgiban, živahen oziroma, ki se hitro spreminja pod vplivom razvojnih sil in se torej prilagaja spremembam. V tem okviru lahko *dinamičnost prostora* razumemo kot spreminjanje lastnosti določenega dela ozemlja zaradi naravnih in človekovih vplivov, ki nanj delujejo. Ti vplivi so lahko naravnega ali človeškega izvora in so prostorsko neenakomerno razporejeni ter imajo zato krajevno pogojeno moč. Prostor je po svoji naravi zvezna spremenljivka, enako velja za čas, vendar sta oba za potrebe objektivnih opazovanj po splošno priznanih merilih praviloma razčlenjena na diskretne enote, enotnih ali različnih dolžin, intervalov, meril. Z vidika dinamičnega cestninjenja zato *časovno dinamičnost* opredelimo predvsem kot spremenljivost višine cestnine glede na različna časovna obdobja. Časovna enota je lahko sekunda, ura, dan, mesec, letni čas, leto ali karkoli drugega, kar ustreza opisu lastnosti opazovanega pojava. Časovni intervali, kot enote časa, so lahko ločeni z dogodki, na primer, da določen dogodek predstavlja tipično navzočnost neke spremembe pri pojavu/predmetu, ki ga opazujemo (Veljanovski 2007, 14).

Motoriziran promet je prinesel številne prednosti in ugodnost, vendar tudi poslabšanje stanja okolja in varnosti ter povečane zastoje. Prometni kazalniki kažejo na nadaljnjo rast števila udeleženih vozil in prometni zastoji naj bi se povečevali še hitreje. Prometne konice se širijo. Večina zastojev se zgodi na mestnih območjih in strateških daljinskih povezavah v bližini

mest. Naš vzorec bivanja, dela in obnašanja vodijo k številčnejšim in daljšim vožnjam, z manjšim številom potnikov v vozilu (Čampa et al. 2009; DRSC 2008). Avtorji študije izvedljivosti uvedbe cestninjenja v Združenem Kraljestvu ugotavljajo, da je za naslavljanje težav z zastoji na voljo mnogo orodij, na primer boljši javni promet, dobro omrežje kolesarskih stez, večja zmogljivost cest, boljše prostorsko načrtovanje, sopotništvo (angl. car share) ter sistem parkiraj in se pelji (angl. park and ride). Vendar so lahko na območjih velikega povpraševanja njihovi učinki le kratkoročni, če novo povpraševanje zamenja starega. S cestninjenjem, ki naslavlja zastoje in obremenjevanje okolja, postanejo druge izbire razmeroma bolj privlačne. Cestninjenje zato na nek način »zaklene« prednosti in koristi ostalih ukrepov, saj drugače nov promet hitro nadomesti preusmerjenega (Devereux et al. 2004).

Vključitev zunanjih stroškov prometa v cestninjenje in razumna namenska poraba zbranih sredstev, lahko prineseta nekatere prednosti, na primer izboljšanje kakovosti zraka, zmanjšanje hrupa ter zanesljivejši javni in učinkovitejši tovorni promet. Vendar je treba ob tem dobro razumeti vpliv prometa na posameznike in regije ter proučiti kako različne strukture plačevanja vplivajo na posamezne kategorije uporabnikov cestnega prometa. Devereux et al. (2004) ugotavljajo, da ima boljši način plačevanja večji vpliv kot celoten znesek plačila, vendar je skupen učinek odvisen tudi od porabe sredstev. Cestninjenje je lahko do voznikov kot skupine nevtrarno, tako da skupaj ne plačujejo več kot že sicer v obliki raznih davkov. Lahko pa je to dodaten prihodek, ki se nameni na primer povečanju zmogljivosti cestne infrastrukture, izboljšanju javnega prometa ali zmanjšanju ostalih davkov.

## 2.2 Vloga in oris obstoječih raziskav

Posebna pozornost raziskav na področju cestninjenja v Evropski zvezi je namenjena varovanju okolja, pravičnosti elektronskega cestninskega sistema za uporabnike ter zmanjšanju poslovnih stroškov. Poudarek je na uvedbi inteligentnih transportnih sistemov in medopravnosti sistemov pobiranja cestnine, saj se tako zmanjša številne težave; manjše je število potrebnih oskrbnih mest z ustreznimi napravami in s tem so manjši stroški delovanja, uporaba naprav za voznike je enostavnejša in cenejša, lažja sta nadzor in izterjava



morebitnih tujih neplačnikov, lažje je tudi sodelovanje med pobiralci cestnin, policijo in izvajalci prometne politike v drugih državah.

Zaradi usmeritve prometne politike Evropske zveze k vključevanju zunanjih stroškov prevoza v končno višino cestnine (Evropska komisija 1995, 2001, 2005) mora biti model cestninjenja zasnovan na predpostavkah in podlagah, ki omogočajo njegovo aplikacijo na evropski ravni.

### 2.2.1. Dokumenti in usmeritve EU pri zaračunavanju cestnine

Prometna politika Evropske zveze, načrtovana v Beli knjigi o prometu (Evropska komisija 2001) in revidirana v vmesnem pregledu Bele knjige o prometu (Evropska komisija 2006), predvideva pametno zaračunavanje infrastrukture in spremembo zaračunavanja z vključitvijo zunanjih stroškov prometa, kot so okoljski stroški, stroški hrupa, zastojev in stroški povezani z zdravjem. Pametno zaračunavanje mora zagotoviti poštene in nediskriminatorne cene za uporabnike, prihodke za prihodnja infrastrukturna vlaganja, načine za razrešitev prezasedenosti, popuste za nagraditev okolju prijaznejših in učinkovitejših vozil ter voznje.

Ker je problematika cestnega tovornega prometa posebno pereča, sta bili z namenom poenotenja sistema dajatev za uporabo cestne infrastrukture znotraj EU izdani direktiva 1999/62/ES (t.i. direktiva »Eurovignette«) in njena dopolnitev direktiva 2006/38/ES, ki definirata okvire za cestninjenje tovornega prometa z vozili, katerih nosilnost presega 12 t. Predvidevata uporabo načel, po katerih bo v prihodnje zunanje stroške prometa poravnali tisti, ki bo prometne storitve uporabljal (uporabnik), oziroma tisti, ki bo onesnaževal okolje (onesnaževalec oziroma povzročitelj), v skladu z dejanskim obsegom aktivnosti. Omejitev trenutno veljavne direktive je, da cestnina vsebuje le infrastrukturne stroške, ki so lahko med uporabnike razporejeni glede na lastnosti vozila in okoljske parametre.

Kritiki tovrstnega pristopa svarijo, da bi bilo pred prevzemom načela plačevanja onesnaževalca v prometno politiko potrebno opraviti študije sprejemljivosti in vpliva. Potrebno bi bilo upoštevati tudi gospodarsko učinkovitost, saj ni vedno onesnaževalec tisti, ki lahko zunanje stroške zmanjša z najmanjšim ekonomskim vložkom, temveč sta to lahko tudi »onesnaženec« ali država. Gre za t.i. princip najcenejšega izogibanja stroškom (Schmidtchen et al. 2008).

Direktiva 2004/52/ES o interoperabilnosti elektronskih cestninskih sistemov dovoljuje sobivanje tehnologije mikrovalov kratkega dosega (angl. dedicated short-range communications, DSRC) in satelitskega določanja lokacije (angl. global navigation satellite system, GNSS), v povezavi s tehnologijo mobilne telefonije (GSM/GPRS). Tovrstni način cestninjenja omogoča bistveno lažjo izvedbo zaračunavanja prostorsko in časovno raznolike cestnine.

### 2.2.2. Pregled obstoječih pristopov dinamičnega cestninjenja in izdelava modela

Cilji uvajanja novih načinov cestninjenja so različni, večinoma pa se zanje odloča (na ravni mest ali držav) zaradi zmanjševanja cestnih zastojev (na primer Šanghaj, Singapur, New York in Velika Britanija), zagotavljanja sredstev za financiranje posodabljanja cestne infrastrukture (Japonska, Avstrija, Nemčija) in javnega prometa (Bergen, Oslo, København in Nizozemska), zmanjševanja vpliva na okolje (San Francisco in Santiago de Chile), zaščite kulturne dediščine (Rim) in njenega boljšega občutenja (Durham). Seveda so cilji lahko tudi kombinacija več pričakovanih učinkov (Commission for Integrated Transport 2006c).

Že ob sami zasnovi modela dinamičnega cestninjenja se je treba zavedati, da je izbira prave tehnologije sicer pomembna, vendar je največja prepreka, ki jo moramo premagati pri uspešnem uresničevanju katerekoli večje pobude novega načina izračunavanja cestninjenja in njegovega uvajanja, sprejemljivost, tako javna, kot politična. Zato morajo biti zaradi vpliva, ki ga imajo na sprejemljivost, upoštevani tako detajlno načrtovanje sheme, njeni odnosi z ostalimi vidiki prometne politike, podkrepitev z utemeljenimi rezultati raziskav, kot poraba prihodkov (Commission for Integrated Transport 2006b). Uporabnike je treba prepričati, da je nov način cestninjenja namenjen izboljšanju stanja v prometu in doseganju tudi drugih koristi in ni le sredstvo za pridobivanje dohodka.

V Sloveniji za tovorna vozila velja sistem plačevanja cestnine za cestninske ceste na cestninskih postajah, ki kolikor mogoče sledi načelu plačevanja glede na prevoženo razdaljo, deloma tudi obremenitev (Kastelic 2001, 39). Za osebna in kombinirana vozila od sredine leta 2008 velja t.i. vinjetni sistem, ki je njegovo nasprotje, saj gre za pavšalno plačevanje

cestnine, ki ne omogoča nikakršne diskriminacije z vidika časa, prostora ali prevožene razdalje.

Rebolj (2006) na podlagi pregleda tuje in domače literature ugotavlja, da mora prenovljen model procesov elektronskega cestninskega sistema v Sloveniji prek ustreznih programskih orodij omogočati enostavno integracijo v obstoječi informacijski sistem cestnega gospodarstva ter izmenjavo informacij z urejevalnikom podatkov o vozilih, urejevalnikom cestnih podatkov in z aplikacijo za povezavo z zunanjimi zbirkami podatkov. Funkcionalni model tovrstnega sistema je sestavljen iz centralnega sistema in njegovih procesov: komunikacijskega (obveščanje uporabnikov), klasifikacijskega (določanje tarifnih razredov) in nadzornega (upravljanje prometnih tokov); pomemben del so tudi telekomunikacijske povezave. Proces za določanje tarifnih razredov naj bi skrbel za porazdelitev gostih prometnih tokov prek celega dneva, zunaj kritičnih obremenitev v urnih konicah, predvsem v okolici večjih mest (Ljubljana) ter za zmanjšanje zastojev in emisij škodljivih snovi v okolje. Avtor nadalje ugotavlja, da bi se moralo pri prenovi cestninskega sistema poleg načela »uporabnik plača« upoštevati tudi načelo »onesnaževalec plača«.

Tovrstnemu principu je sledila študija dinamičnega cestninjenja z upoštevanjem vidikov trajnostnega razvoja, ki so jo izvedli Kulauzović et al. (2005; Kokot et al. 2008). Izhodišča za pripravo metodologije so bila pripravljena glede na priporočila ekspertnih skupin v EU. Študija je zajela preučitev vplivov cestnega prometa na okolje z vidika številnih dejavnikov, ki so bili ocenjeni z vidika upoštevanja trajnostnega razvoja, prostora in časa (dnevno, tedensko in sezonsko), različnih klasifikacij vozil (cestninski razredi) in trajanja vpliva prometa na okolje (kratkotrajni in dolgotrajni vpliv). Za vsak dejavnik je bila navedena zakonodajna osnova, definirana njegova merljivost in opredeljena zanesljivost izdelanih meritev. Skupaj z ocenjevanjem posameznih dejavnikov je bila opredeljena tudi povezava med posameznimi dejavniki in njena moč.

Z opredeljenimi dejavniki se poda oceno kratkoročnega in dolgoročnega vpliva cestnega prometa na okolje. Takšna ocena lahko služi kot podlaga za:

- določitev tarife cestnine:
  - na posameznem odseku državnih cest,
  - v različnih časovnih obdobjih,

- glede na predlagano klasifikacijo (cestninske razrede) vozil,
- lokacijsko in časovno usmerjanje prometa ter
- pomoč pri sprejemanju odločitev o morebitni izgradnji novih cest ali o spremembah obstoječih cest na določenem območju.

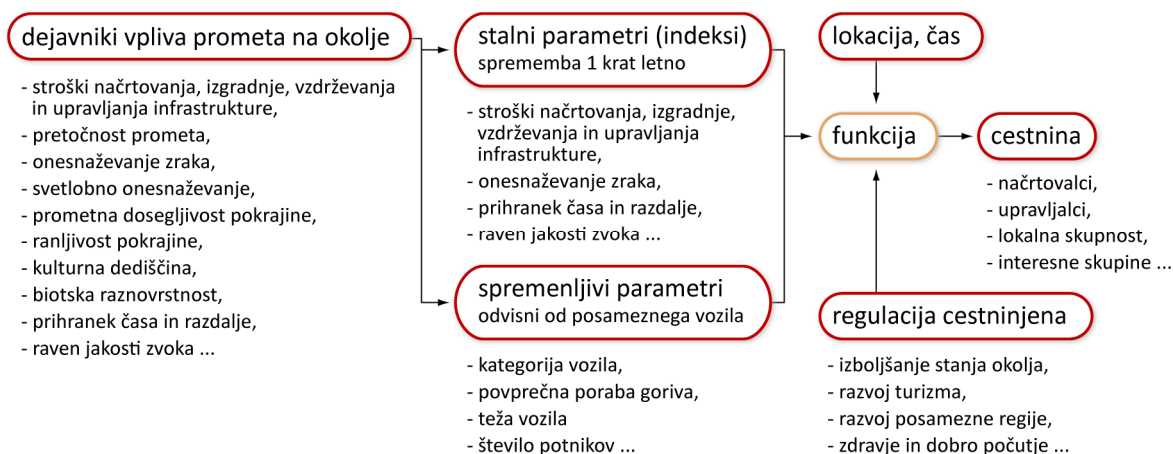
Izpostavljeni so bili tudi možni parametri iz obstoječih veljavnih pravnih predpisov EU in Slovenije. Parametri so konkretne, praviloma merljive oziroma določljive vrednosti, ki opredeljujejo posamezni dejavnik vpliva cestnega prometa na okolje. Vsi parametri so krajevno in časovno odvisni, možno pa jih je združiti v skupine, in sicer na parametre cestne infrastrukture, vozil, prebivalstva oziroma družbe, naravne in kulturne dediščine ter druge.

Prototipni model kot funkcijo cestnine povezuje stalne in spremenljive parametre, ki izhajajo iz dejavnikov vpliva, lokacijske in časovne podatke ter regulatorje cestninjenja. Stalni parametri so statični oziroma polstatični element modela – ko jih enkrat določimo in kalibriramo, jih občasno ali periodično osvežujemo, na primer enkrat letno. Njihov nabor in vrednosti se namreč (počasi) spreminjajo, sama metodologija določanja pa ne ali vsaj ne znatno. Sam izbor parametrov je pomemben in razmeroma zapleten postopek, saj moramo upoštevati merljivost, zakonske podlage, možnosti določanja parametra in podobno. Stalni parametri so na primer stroški načrtovanja, izgradnje, vzdrževanja in upravljanja infrastrukture, ranljivost pokrajine, prihranek časa in razdalje ter raven jakosti zvoka. Spremenljivi parametri so lastni posameznemu vozilu in so na primer kategorija vozila, povprečna poraba goriva, število potnikov in teža vozila. Spremenljivi parametri oziroma parametri vozila neposredno vplivajo na konkretno vrednost cestnine za posamezno vozilo. Z regulatorji cestninjenja regulativni organ (pristojno ministrstvo, Direkcija RS za ceste, DARS ali druga pooblaščen organizacija) vpliva na cestnino. S faktorji regulacije je možno spodbujati ali omejevati promet na določenih območjih in v določenem časovnem obdobju (na primer v času prometnih konic). Opredeljeni so glede na področja, ki jih želimo razvijati oziroma spodbujati. To so na primer različne gospodarske panoge, izboljšanje stanja okolja, razvoj posamezne regije ter zdravje in dobro počutje. Sama funkcija določitve višine cestnine je podana v le najbolj osnovni obliki (nekoliko prilagojena enačba spodaj), saj njena natančnejša določitev presega okvir študije.

$$\text{cestnina (lokacija, čas)} = F(\text{trajni parametri, spremenljivi parametri, regulatorji}) \quad (1)$$

Kulauzović et al. (2005) poudarjajo, da je treba v nadaljnjih raziskavah vsak dejavnik vpliva ovrednotiti in zanj podati skupno oceno (faktor vpliva) ter iz celotnega nabora parametrov izbrati najpomembnejše. Sam dodajam, da je treba v nadaljnjih študijah bolje opredeliti tudi posamezne dejavnike vpliva in jih razvrstiti med bremena (emisije), onesnaževala in dejanske vplive.

Podana enačba predstavlja zelo obsežno in podrobno metodo za izračun cestnine na določenem cestnem odseku ali kilometru, v določenem času in za določeno skupino vozil v skladu s klasifikacijo. Kljub temu je njen izračun preprost in bi ga bilo zlahka vgraditi v enostaven računalniški sistem.



Slika 2: Model dinamičnega cestninjenja (prirejeno po Kulauzović et al. 2005).

Figure 2: Dynamic road pricing model (based on Kulauzović et al. 2005).

Tako zastavljen model omogoča ne le pravično zbiranje cestnine, ampak tudi njeno pravično razdeljevanje. Z obratno funkcijo (oziroma preslikavo modela) lahko namreč določimo kolikšen delež zbranih sredstev je potreben za odpravljanje oziroma zmanjševanje konkretnega vpliva prometa na okolje. S tem se lahko načrtovalcem, upravljavcem, lokalnim skupnostim in drugim interesnim skupinam povrne dejanske stroške oziroma nastalo škodo.

Vzpostavitev tovrstnega sistema izračunavanja cestnine je zahtevna naloga, saj je potrebno sodelovanje med pristojnimi vladnimi organi, lokalnimi skupnostmi in drugimi soudeleženci, ki se morajo dogovoriti o spremenljivosti posameznih elementov cestnine ter kje in kdaj jih uporabiti. Ustrezna določitev strukture cestnine in dopolnilnih krajevnih ukrepov zahteva natančno krajevno poznavanje uporabe in uporabnikov cest, njihovih potreb in življenjskih

slogov ter natančno opredelitev kriterijev in ciljev, saj se posameznik za določeno pot poleg višine cestnine (višja, nižja), odloči tudi na podlagi:

- stanja na cesti (zastoji, pluženje in podobno),
- možnosti odločitve (druge možne poti, razpoložljivost časa, tip potovanja) in
- predznanja oziroma osebnosti (socialna (družina, samskost in podobno) ekonomska in izobrazbena pripadnost).

Smiselnost in vrsto razlikovanja cestnine je potrebno opraviti po posameznih odsekih na podlagi celostne analize mikrolokacije, saj je mogoče le na tak način doseči želene rezultate. Individualna obravnava posameznega kriterija, brez upoštevanja ostalih dejavnikov, namreč lahko vodi do nesprejemljivih in napačnih odločitev.

Načrtovanje in priprava sta zelo pomembna za delovanje sheme cestninjenja v praksi, vendar je prav tako pomembno doseči politično podporo projektu. Politiki se dobro zavedajo spornosti, ki se nanaša na vpeljavo novih načinov cestninjenja, prav tako tudi potencialnega posledičnega neuspeha ob naslednjih volitvah. Zato morajo imeti ob odločitvi za podporo projektu oporo v arzenalu dejstev, podkrepljenih z izdatnimi in robustnimi modeli, analizami in napovedmi.

## 2.3 Dejavniki vplivov cestnega prometa na okolje

Vplivi prometa na okolje so večplastni, prepletajoči ter včasih nejasni in težko merljivi. Zunanji vplivi so zelo raznoliki in pokrivajo na primer različne učinke emisij velikega števila onesnaževalcev in hrupa na človeško zdravje, ekosisteme, živalstvo in rastlinstvo. Vplivi se odražajo na krajevni, regionalni, evropski in svetovni ravni. Škoda povzročena s prometnimi dejavnostmi je lahko takojšnja in neposredna, vendar se lahko nadaljuje tudi daleč v prihodnost (Ricci in Rainer 1999, 4).

Vpliv cestnega prometa na okolje lahko razčlenimo v štiri glavne skupine (Evropska komisija 2004, 22-24; Friedrich in Bickel 2001; Maibach et al. 2007):

- Gradnja cestne infrastrukture. Neposreden vpliv imata zasedanje prostora in sama gradnja cestnega telesa. Poglavitno okoljsko tveganje predstavljajo vplivi na relief,

prsti in podtalnico, mikroklimatske spremembe, drobitev pokrajine, izgubo habitatov, in prizadet estetski videz.

- Hrup in tresljaji. Prometne dejavnosti so velik vir hrupa. Emisije hrupa so odvisne od intenzivnosti in lastnosti prometnih tokov. Izpostavljenost hrupu zmanjšuje kakovost življenja, ogroža zdravje in ima moteč vpliv na živali.
- Onesnaževanje zraka. Cestni promet je pomemben vir prašnih delcev in plinastih onesnaževalcev, ki imajo negativne zdravstvene posledice, povzročajo škodo na zgradbah in materialih, zmanjšujejo donose v kmetijstvu ter vplivajo na biosfero, biotsko raznovrstnost in ekosisteme (prst ter vodo oziroma podtalnico). Glavni onesnaževalci zraka so dušikovi oksidi ( $\text{NO}_x$ ), lahkohlapne organske spojine (angl. volatile organic compound, VOC), dušikov monoksid (CO), dušikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ) žveplov dioksid ( $\text{SO}_2$ ), prašni delci ( $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$ ), svinec (Pb) in ozon ( $\text{O}_3$ ), prsti pa krom (C), svinec in cink (Zn).
- Drugi vplivi. Mednje sodijo prispevek k izgubi biotske pestrosti zaradi drobitve habitatov in motenja življenjskega ritma živali, soljenja in vnosa sredstev proti zmrzali na cestiščih, vplivi zaradi razvoja (na primer pospešena gradnja v okolici) in povečano tveganje naravnih nesreč zaradi s prometom povezanih sprememb rabe tal, pokrajine in podnebja.

Škodljivi učinki se kažejo tudi ob:

- nesrečah, ki se odražajo v izgubljenih življenjih, zdravstvenih težavah, okoljskih posledicah zaradi izpustov nevarnih snovi in ekonomski škodi ter
- zastojih, ki vplivajo na izgubo časa, povzročanje stresa, zmanjšano mobilnost in ustvarjanje ekonomske škode ter na povečanje porabe goriva in onesnaževanje zraka.

Omeniti je treba tudi pozitivne učinke, saj je s prometom omogočena mobilnost oseb in blaga, prav tako je zaradi večje dostopnosti omogočen lažji in hitrejši gospodarski razvoj.

Kot že omenjeno, se le nekateri učinki onesnaževanja okolja pokažejo takoj. Večinoma se škodljivi učinki postopno in dalj časa kopičijo, potem pa povzročijo hujše posledice. Kakšne

so ali bodo posledice prometnih obremenitev okolja, je v veliki meri odvisno od značilnosti in narave vsake pokrajine ter njenih samočistilnih sposobnosti<sup>2</sup>. Te so v slovenskih pokrajinah dokaj skromne, zato sta narava in človekovo okolje zelo izpostavljena učinkom prometa. Marsikje so resno načete nevtralizacijske in regeneracijske sposobnosti narave, čeprav škode zaradi razpršene narave prometa ali skupnih učinkov z vplivi industrije ali proizvodnje energije ni enostavno ugotoviti. Tako so učinki gradnje prometne infrastrukture ter emisij škodljivih snovi ali hrupa takojšnji in neposredni. Drugi učinki postanejo očitni šele po razmeroma dolgem časovnem obdobju. Takšne so emisije toplogrednih plinov, katerih posledice se kažejo v svetovnih podnebnih spremembah (segrevanju ozračja), teh pa nekatere vplivne države iz ekonomskih motivov nočejo priznati. Vse to ima tudi socialne posledice, saj škodo trpijo ljudje (Cigale 2002, 33).

Mesarec et al. (2004, 3) ugotavljajo, da ekonomska teorija in praksa še ni enotna in še vedno išče odgovore na vprašanja o sodobnem trajnostnem prometu. Raziskovalci so prisiljeni k iskanju številnih izvirnih teoretičnih in praktičnih rešitev in ocen tako na področju samih metod izračunov kot tudi na področju iskanja prvotnih in drugotnih podatkov za konkretne izračune, zato jih bo v prihodnosti treba pridobiti z načrtnim raziskovalnim delom. Nadalje ugotavljajo, da je za doseganje uporabnih in primerljivih rezultatov nujno poenotenje (na državni in mednarodni ravni) vrednotenja posameznih spremenljivk zunanjih stroškov prometa, kot so na primer: denarni izraz enote hrupa, cena kubičnega metra škodljivega plina, izpuščenega v ozračje, cena – vrednost človeškega življenja, cena zdravja in pripravljenost za plačilo odprave motenj okolju. Rezultat raziskave mora biti konkretna višina stroška, ki jo lahko uporabimo v konkretnem izračunu prometne storitve, ne pa razpon

---

<sup>2</sup> Samočistilne zmogljivosti so, poleg nevtralizacijskih in regeneracijskih, del nosilnih sposobnosti okolja. Metodo njihovega ugotavljanja na ravni pokrajinskoekoloških tipov, pokrajinskoekoloških enot in podenot ter posamezne pokrajintovorne sestavine podaja Študija ranljivosti okolja (Špes et al. 2002). Za oceno nosilne sposobnosti prostorske enote funkcijsko vrednotimo naravnogeografske značilnosti oziroma fizičnogeografske kazalnike. Izbrani so tisti, ki neposredno vplivajo na nevtralizacijske sposobnosti zraka (na primer veter, megla, inverzija), površinskih in talnih vod, prsti, reliefa, naravnega rastja in okolja kot celote. Pri vsaki pokrajintovorni sestavini so izdvojeni pomembnejši kazalniki, ki imajo večjo težo pri ugotavljanju njegove nosilne sposobnosti, saj ta ocena nikakor ne more predstavljati aritmetične sredine razredov za posamezne fizičnogeografske kazalnike.



višine stroškov. Velik korak v tej smeri je raziskava Impact, ki analizira ukrepe in pristope ponotranjenja vseh zunanjih stroškov prometa v Evropski zvezi (Maibach et al. 2007). Vendar kljub podajanju enotnega postopka izračunavanja ne poda zadovoljivega odgovora na vprašanje etičnosti. Veliko spremenljivk namreč temelji na bruto družbenem proizvodu (BDP) oziroma kupni moči prebivalcev posameznih držav, kar med drugim pomeni, da so stroški na prevozeni kilometer v državah z višjim BDP večji (ob njihovem upoštevanju posledično tudi cestnina), ne glede na enake ostale predpostavke (okoljski parametri, parametri vozila in podobno). Poleg gospodarskih kazalnikov so stroški med različnimi območji spremenljivi tudi zaradi drugačnih družbenih izhodišč, saj so izračuni posameznih stroškov poleg obsega in jakosti določenega vpliva neposredno odvisni tudi od človekovega dožemanja motnje tega vpliva. Za vrednotenje se uporabljajo principi pripravljenosti plačati za zmanjšanje tveganja oziroma izboljšanje stanja (angl. willingness to pay), pripravljenosti sprejetja nadomestila za neukrepanje (angl. willingness to accept) in pristop sledenja vplivu<sup>3</sup> (angl. impact pathway approach), ki se uporablja za ocenitev stroškov dolgoročnih vplivov in je bil posebej razvit za onesnaževanje zraka ter nato prilagojen za hrup.

Pri oceni *spremenljivk*, ki so potrebne pri izračunih posameznih zunanjih stroškov prometa in so potencialno zanimive za pridobivanje z daljinskim zaznavanjem, sem se oprl na študije, ki se ukvarjajo z zunanjimi stroški in poenotenjem metodologije na splošno (na primer Verhoef 1998; Mesarec et al. 2004; Maibach et al. 2007), kot tudi tiste, ki se ukvarjajo s posameznimi področji, na primer z ravnmi zvoka v okolju (Chiari et al. 2007; Van Maercke 2007), emisijami plinov in prašnih delcev (Rainer in Bickel 2001; Heimann et al. 2007) ter biotsko raznovrstnostjo (Strand et al. 2007). Ugotovitve podajam v naslednjih odstavkih.

Pri ugotavljanju prostorske razmestitve jakosti zvoka, so pomembni naslednji parametri, za katere se lahko poda oceno tudi z uporabo daljinskega zaznavanja oziroma pri katerih daljinsko zaznani podatki lahko pomembno pripomorejo k modeliranju prostorske

---

<sup>3</sup> Pristop sledenja vplivu se nanaša na niz dogodkov in procesov, ki povezujejo breme (onesnaževalec) z vplivom in posledično vrednotenje; na primer emisije → promet in kemične pretvorbe → koncentracija in odlaganje → odziv sprejemnikov → fizični vpliv → sprememba uporabnosti (koristnosti) → izguba oziroma zmanjšanje blaginje → stroški (Rainer in Bickel 2001, 5-6).

razmestitve objektov in pojavov: reliefna izoblikovanost, lomne linije reliefa, protihrupne pregrade (lokacija, višina, nagib), stavbe (lokacija, višina, oblika), zvočna impedanca tal in podnebni podatki (temperatura, vlažnost, smer in hitrost vetra, oblačnost).

Negativne vplive prometa na kopne ekosisteme lahko razdelimo v tri kategorije:

- učinki na fizično strukturo pokrajine, kot sta neposredna izguba ozemlja in razdrobljenost (fragmentacija) habitatov,
- učinki upravljanja s prometnimi potmi in okoliškimi zemljišči, na primer sečnja in odstranjevanje rastja, soljenje in odvodnjavanje,
- učinki zaradi uporabe prometnega sistema, na primer vpliv zračnih emisij, smrtnost živali in širjenje tujerodnih vrst.

Pomembno je vedeti, da zaradi velike krajevne odvisnosti ni mogoče vzpostaviti splošne povezanosti med prometnimi aktivnostmi in vplivi na (pol)naravne ekosisteme. Z vidika biotske raznovrstnosti so za cestninjenje zanimivi naslednji parametri: lokacija in obseg nakopičenja posameznih vrst, obseg habitatov<sup>4</sup> (neposredno ugotavljanje, posredno ugotavljanje, modeliranje), spremenljivost površine vodnih teles in količine vode v njih, združitvev bioloških in fizikalnih ocen, spremembe kakovosti habitatov in ekosistemov<sup>5</sup>, ocena nedotaknjenosti ekosistemov, površina in število nedrobljenih velikih delov gozda, razdrobljenost gozda, lokacija in površina starih gozdov, ocena degradacije ekosistemov in napredovanje invazivnih vrst.

Čeprav je neposredno spremljanje vrst z daljinskim zaznavanjem (t.j. ugotavljanje razmerja med spektralnimi lastnostmi podatkov in vrstami ali razporeditvijo biološke raznovrstnosti)

---

<sup>4</sup> Habitat (bivališče) je tip neposrednega naravnega območja (biotopsko in biotsko zaključena enota kot življenjski prostor) z vsemi dejavniki, na kar je prilagojena vrsta, skupina ali posamezni osebek (Lah 2002b, 35).

<sup>5</sup> Ekosistem oziroma ekološki sistem je v funkcionalno celoto povezani del žive (rastlinstvo, živalstvo in človeška družba) in nežive narave (zrak, podnebje, voda in tla), v kateri krožijo snovi in se pretaka energija. Naravni ekosistemi: morja in vode na kopnem, gozdovi, travnata in druga območja. Umetni ekosistemi: vodna zajetja in ribniki, različni nasadi, izkrčeni gozdovi in obdelovalna tla. Ekosistem je višji sistem kot biocenoza in nižji kot pokrajina ter ima lahko različne razsežnosti (Lah 2002b, 55).

razmeroma redko, se uporabnost napovedovanja oziroma ugotavljanja verjetnosti razporeditve in modeliranja povečuje z razvojem orodij modeliranja in statistike ter novimi podatki. Tovrstne študije večinoma povezujejo spoznanja o razmeščenosti vrst s terenskih raziskav z modeliranjem okoljskih spremenljivk (na primer habitatov, nadmorske višine, padavin) (Loucks in Leimgruber 2007, 121-122).

Modele širjenja emisij plinov in prašnih delcev v grobem delimo na krajevne (razdalja do približno 20 km od vira), regionalne in svetovne. Pri vseh sta pomembni skupini vhodnih podatkov:

- podnebni podatki (na primer smer in hitrost vetra, stabilnost atmosfere, višina plasti mešanja, množina in razporeditev padavin, temperatura, vlaga, množina vode v oblakih) in
- podatki o hrapavosti površja (angl. surface roughness, to je razgibanost reliefa in pri nekaterih pokrovnost).

Drugi z manjšanjem merila izgubljajo na pomenu, povečuje pa se pomen natančnih modelov kemičnih reakcij. Pri prometu so prevladujoči krajevni učinki, saj se emisije sproščajo pri tleh, pogosto na območjih z visoko gostoto prebivalstva. Pomembni so še podatki, s katerimi opredeljujemo razmerje med odmerkom in učinkom (angl. dose-response) oziroma izpostavljenostjo in odzivom (angl. exposure-response) ter vpliv na, na primer, zdravje ljudi (prostorska razmerja) ter propadanje gradbenih materialov in učinke nalaganja delcev (temperatura, relativna vlažnost, množina padavin) (Rainer in Bickel 2001).

## 2.4 Izbor spremenljivk

Za Slovenijo so skupni zunanji stroški prometa po metodologiji Infrac/WWI, za leto 2002 ocenjeni na 6,6 do 9,4 % BDP, s 33 % napovedano rastjo do leta 2010 (Mesarec in Lep 2004, XI). Največ prispevajo emisije izpušnih plinov in delcev (skupaj s podnebnimi spremembami), prometne nesreče, hrup in zastoji. Iz pregleda literature je opaziti odstopanje med ocenami na evropski ravni in tistimi na ravni posameznih držav, saj so pri slednjih ocenjeni stroški višji zaradi bolj verodostojnega upoštevanja krajevnih vplivov. Vendar se kljub temu v vseh ocenah zaradi širine tematike, izrazite večdisciplinarnosti in razmeroma

novega področja raziskav pojavljajo številne izkustvene predpostavke, domneve in (včasih dokaj groba) posploševanja, zato avtorji poudarjajo osveževanje, poglobljanje in nadgradnjo študij, tudi s stališča preverjanja, poglobljanja in bolj natančne opredelitve teoretičnih izhodišč.

Pri odločitvi za nabor spremenljivk sem se moral opredeliti med »pavšalnim« ocenjevanjem določljivosti spremenljivk in podrobnim preverjanjem vplivov in posledic, ki jih vnesemo z različno pridobljenimi spremenljivkami. Odločil sem se za slednje, zato sem študijo omejil na ugotavljanje ravni jakosti zvoka (hrupa) in na spremenljivke, ki jih pri tem potrebujemo. Odločitev utemeljujem z dobro tehnično določljivostjo ter velikim naborom zahtevanih spremenljivk in njihovih kazalnikov, ki so uporabni tudi pri študijah drugih vplivov. Podatki o reliefu in pokrovnosti oziroma njenih spremembah, na primer, so osnova pri veliki večini študij okoljskih parametrov, na primer širjenja onesnaževal po zraku, ugotavljanju ranljivosti talne vode, ocenjevanja okoljskih parametrov, stanja kulturne dediščine in podobno. Spremenljivke, ki izhajajo iz parametra hrup in za katere sem na študijskem območju preverjal določljivost s podatki in metodami daljinskega zaznavanja, v veliki meri tudi metodami geografskih informacijskih sistemov, so:

- strukturne oblike (sredinska linija voznega pasu, stavbe, protihrupne pregrade),
- reliefna izoblikovanost in lomne linije terena ter
- zvočna impedanca tal.

Zaradi pomembne vloge nekaterih podnebnih spremenljivk pri ugotavljanju širjenja oziroma vpliva za številne parametre, za izbrane navajam nekaj metod določevanja in pričakovane natančnosti.

### 3 OSNOVE MODELIRANJA RAVNI ZVOKA

V tem poglavju podajam teoretična izhodišča modeliranja ravni zvoka in z njimi utemeljujem odločitve pri pripravi podatkov v poglavju 4.

Hrup je vsak zvok, ki v naravnem in življenjskem okolju vzbuja nemir, moti človeka in škoduje njegovemu zdravju ali počutju ali škodljivo vpliva na okolje. Je izrazito mikrolokacijsko pogojena spremenljivka. Zaradi subjektivnega doživljanja, ga ne moremo meriti, merimo lahko le ravni zvoka<sup>6</sup>. Te so desetiški logaritem razmerja dejanske zvočne jakosti (intenzitete) ter referenčne zvočne jakosti (na meji slišnosti). Tako definirane ravni zvoka izražamo v decibelih<sup>7</sup>. Človeško uho ne zaznava vseh frekvenc zvoka enako. Nižja je frekvenca zvoka, manjša je občutljivost ušesa na tak zvok. Da bi to dejstvo, ko govorimo o ravneh zvoka, upoštevali, se uporablja v merilnih instrumentih ustrezno frekvenčno

---

<sup>6</sup> S fizikalnega stališča med konceptoma zvoka in hrupa ni razlike, obstaja pa pomembna razlika za poslušalca – hrup je kategorija zvokov, ki jih označujemo kot neželene (Berglund in Lindvall 1995, 3). Hrup je na primer tudi zvok komarja, ki nas zbudi ponoči.

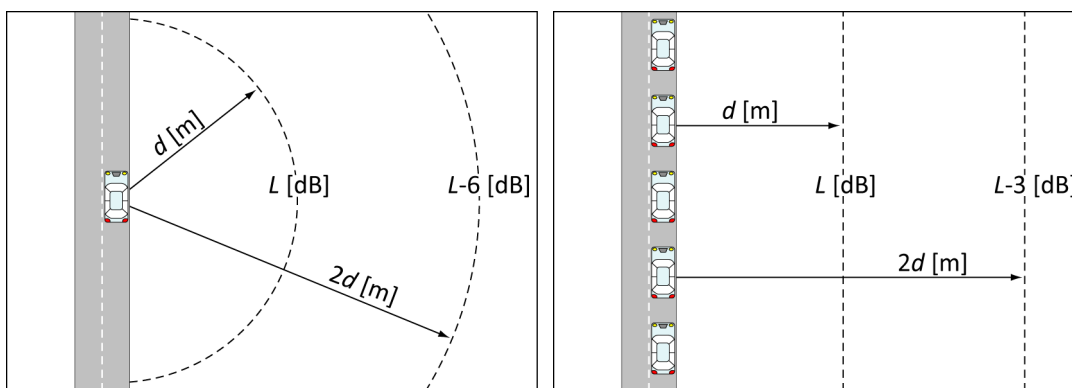
<sup>7</sup> Zvočno valovanje opredeljujejo amplituda sprememb zvočnega pritiska, frekvenca valovanja in hitrost širjenja. Hitrost zvoka ( $c$ ), frekvenco ( $\nu$ ) in valovno dolžino ( $\lambda$ ) povezuje enačba  $\lambda = c / \nu$ . Raven energije zvoka, ki prispe do ali prečka enoto površine pravokotno na smer širjenja, imenujemo zvočna jakost (intenziteta). Celotno energijo zvoka, ki jo oddaja vir na enoto časa, imenujemo zvočna moč in jo merimo v vatih (W), jakost zvoka pa v  $\text{Wm}^{-2}$ . Ker je razpon zvočnega pritiska, na katerega je občutljivo človeško uho, zelo velik (med  $10^{-5}$  in  $100 \text{ Nm}^{-2}$ ), ga običajno izražamo z logaritemsko lestvico v dB. Raven jakosti zvoka je definirana kot desetkratnik desetiškega logaritma razmerja med jakostjo proučevanega zvoka in jakostjo nekega drugega zvoka. Za vpeljavo absolutnih ravni, je potreben dogovor o referenčni vrednosti. Zato je raven zvočnega pritiska ( $L_p$ ) za zvok izražen v dB odvisna od povprečja kvadratov zvočnega pritiska, tako da velja

$$L_p = 10 \cdot \log \left( \frac{p}{p_{ref}} \right)^2,$$

kjer referenčni pritisk  $p_{ref}$  po mednarodnem dogovoru znaša  $2 \cdot 10^{-5} \text{ Nm}^{-2}$  (Berglund in Lindvall 1995, 4-5).

filtriranje s t.i. korekcijskim filtrom »A«, ki simulira občutljivost človeškega ušesa. Ugotovljene ravni zvoka izražamo v tem primeru s korigiranimi decibeli, dB(A).

Problem onesnaževanja s hrupom je v zadnjem desetletju predmet intenzivnega raziskovanja, saj postaja vedno bolj pereč. Veliko dela je bilo vloženo v izdelavo modelov za ugotavljanje in napovedovanje hrupa cestnega prometa. Modeliranje je neizogibno, saj ravni zvoka v prihodnosti ne moremo meriti, in tudi zato, ker je merjenje ravni zvoka na terenu težavno zaradi števila merilnih mest, ki so potrebna, da dobimo celosten vpogled na zvočno stanje. Terenske meritve tudi niso najbolj gospodarna možnost (Kluijver et al. 2003). Modeliranje hrupa cestnega prometa v okolju opiše proces teoretičnega ocenjevanja ravni zvoka območja v specifičnih okoliščinah. Te so v naravi spremenljive zato posledično v prostoru in času nihajo tudi zvočna polja. Rezultati modeliranja zvoka so le ocena stanja možnih ravni zvoka v okolju. Karte, ki prikazujejo ravni zvoka v okolju, imenujemo karte hrupa. Običajno so karte hrupa dvorazsežne, z vse bolj natančnimi metodami in dosegljivimi trirazsežnimi podatki, pa se za posebne namene izdelujejo tudi trirazsežne karte ravni zvoka (Kurakula 2007).



Slika 3: Shematičen prikaz geometrijskega širjenja zvoka za točkovni (levo) in linijski vir (desno).

Figure 3: A schematic representation of geometrical sound spreading for a point (left) and a line source (right).

Za zelo poenostavljeno oceno ravni zvoka lahko prometni hrup razdelimo na dve komponenti: hrup, ki ga povzroča promet kot celota, in hrup, ki ga povzroča individualno vozilo. Pri skupni ravni zvoka se druga komponenta odraža z najvišjimi vrednostmi ( $L_{10}$  ali  $L_1$ , ki označujeta zgornjih 10 oziroma 1 % vrednosti) in s podvojitvijo razdalje od vira hrupa pojema za 6 dB. Hrup prometa kot celota, ki ga lahko imenujemo tudi hrup ozadja ( $L_{90}$  ali  $L_{99}$ , ki označujeta spodnjih 90 oziroma 99 % vrednosti), pojema za 3 dB pri vsaki podvojitvi razdalje od vira (Hassall in Zaveri 1979). Navedeno sledi iz tega, da se pri individualnem

vozilu zvočni valovi širijo približno kroglasto v vse smeri, pri stalnem prometu pa približno cilindrično (slika 3).

Najpomembnejši parametri pri modeliranju jakosti zvoka so:

- ocena oziroma posplošitev vira ali virov zvoka,
- opredelitev fizičnega okolja (poti) preko katerega se zvok prenaša med virom in sprejemno lokacijo ali območjem, kar vključuje relief, grajeno okolje in lastnosti ozračja (na primer vetrovne in temperaturne značilnosti ter vlažnost) in
- posplošitev načina potovanja zvoka med virom in sprejemnikom.

Izdelava modela za določevanje širjenja zvoka zato sestoji iz opredelitve vira, jakosti in usmerjenosti (angl. directivity, prevladujočih smeri širjenja) zvoka, akustično pomembnih potez okolja, preko katerega se zvok prenaša do sprejemnika (oblika reliefa, impedanca tal, ovire in odbojne ploskve, lastnosti ozračja), in metode izračuna ravni zvoka pri sprejemniku (metoda opredelitve linij, ki povezujejo vir in sprejemnik, in metoda ocene vpliva lastnosti tal in ovir na širjenje zvoka vzdolž teh linij pri določenih vremenskih pogojih).

Jakost zvoka cestnega prometa je seštevek virov posameznih vozil. Pomembnejši viri so motor, izpušni sistem, kontakt med pnevmatikami in vozno površino in vrtinčenje zraka. Slednja prideta do izraza pri večjih hitrostih in ju v študijah hrupa v mestnem okolju lahko zanemarimo. Poenostavljeno lahko privzamemo, da je zvok, ki ga proizvaja cestni promet odvisen od števila vozil in njihovih hitrosti, deleža težkih vozil in lastnosti cestišča. Čeprav je bil dosežen pomemben napredek v zmanjšanju glasnosti posameznih vozil, vpliv hrupa še vedno niža kakovost življenja.

Ker je hrup postal eden izmed osrednjih dejavnikov negativnega vpliva prometa na prebivalstvo, je Evropska zveza sprejela direktivo o hrupu (Direktiva 2002/49/ES), z namenom vzpostavitve skupnega programa manjšanja posledic hrupa in nadzora nad ravnmi zvoka. Direktiva predpisuje izdelavo kart hrupa za vsa strnjena naselja z več kot 250.000 prebivalci in glavne ceste z več kot šest milijonov prevozov vozil letno do leta 2007 ter naselja z več kot 100.000 prebivalci in ceste z več kot tremi milijoni prevozov letno do leta 2012. Z objavo direktive sta postala standardna kazalnika hrupa  $L_{DfN}$  (raven glasnosti zvoka dan-večer-noč) za oceno motnje in  $L_{noč}$  (nočna raven glasnosti zvoka) za oceno motnje

spanca (glej tudi prilogo B). Raven glasnosti zvoka  $L_{DVN}$  v decibelih (dB(A)) je opredeljena z enačbo:

$$L_{DVN} = 10 \cdot \log \frac{1}{24} \left( 12 \cdot 10^{\frac{L_{dan}}{10}} + 4 \cdot 10^{\frac{L_{vecer}+5}{10}} + 8 \cdot 10^{\frac{L_{noc}+10}{10}} \right). \quad (2)$$

Za kartiranje hrupa v prvem krogu države članice lahko uporabijo svojo metodo kartiranja, če jo imajo, oziroma francosko metodo »Bruit des infrastructures de transports terrestres« (NMPB), če svoje metode nimajo. Kazalnike morajo pretvoriti v  $L_{DVN}$ . V drugem krogu je predvideno kartiranje s standardno metodo Harmonoise, ki je deloma še v raziskovalni fazi.

V tej nalogi predmet raziskovanja ni natančnost metod v smislu informacije o zvoku, temveč zgolj v smislu natančnosti priprave in zahtev o vhodnih podatkih.

### 3.1 Francoska metoda NMPB oziroma standard XP S 31-133

Francoska metoda ocenjevanja ravni cestnega hrupa »Bruit des infrastructures de transports terrestres« (NMPB) je tudi začasna predpisana metoda za države EU, ki ne uporabljajo lastnih postopkov. Metoda sredinsko linijo ceste na podlagi različnih algoritmov segmentacije razčleni v točkovne vire. Uporabljeni algoritem (največja dolžina odseka ali največji kotni razmik) je odvisen od enovitosti dejavnikov, ki vplivajo na emisije zvoka in njegovo širjenje, ter želene natančnosti. Emisijske vrednosti zvoka so izračunane po specifikaciji »Guide du Bruit des transports terrestres« in upoštevajo gostoto prometa po kategorijah (lahka vozila in težka vozila – pod in nad 3,5 t), karakteristike prometnega toka (zvezen, sunkovit, sunkovit pospešujoč, sunkovit zavirajoč) ter nagib in tip cestišča (ravne ceste, navzgor – nagib večji od 2 % v smeri dviganja, navzdol – nagib večji od 2 % v smeri spuščanja). Izvor zvoka je postavljen na sredinsko linijo voznega pasu<sup>8</sup>, 0,5 m od tal. Metoda ugotavlja neposredne, odbite in uklonjene poti širjenja zvoka med vsakim virom in

---

<sup>8</sup> Vozni pas je mišljen kot del cestišča, po katerem poteka promet v eno smer; avtocesta ima na primer dva vozna pasova in odstavní pas. Kjer je v nalogi z oznako vozní pas mišljen vozní pas za počasi vozeča vozila, v nasprotju s prehitvalnim pasom, je to razvidno iz besedila.



sprejemnikom, pri čemer upošteva naslednje dejavnike: geometrijsko divergenco, absorpcijo atmosfere, absorpcijo tal, ukrivljanje na ovirah in odboje. Dolgoročne ravni zvoka so določene glede na ugodne ali enotne meteorološke pogoje širjenja in pogostost njihovega pojavljanja (Wölfel et al. 2003a; Wölfel et al. 2003b; Marcola 2009).

Metoda je umerjena ob naslednjih predpostavkah:

- sprejemnik mora biti vsaj 2 m nad tlemi in 2 m pred fasado,
- rezultati so značilni v razdalji do 800 m od cestišča,
- najmanjša hitrost vozil je 20 km/h.

## 3.2 Metoda Harmonoise

Evropska projekta Harmonoise in Imagine povzameta, združita in v določeni meri standardizirata modeliranje ravni zvoka, metode, ki jih predstavita, pa so primerne zlasti za modeliranje referenčnih dolgoročnih vrednosti na razmeroma uravnanim reliefu (Chiari et al. 2007; Defrance et al. 2007; Nota et al. 2005). Za modeliranje v zelo kompleksnih razmerah so primernejše specifične znanstvene metode s terensko izmerjenimi vrednostmi vhodnih podatkov, ki pa so omejene na majhno število posebnih nizov razmer, v katerih so rezultati algoritmov veljavni.

Osnova tehnične metode, kot jo predpiše Harmonoise (Nota et al. 2005), je točkovni model, kar pomeni, da sta hkrati upoštevana le en vir in sprejemnik, prispevek posameznih virov pa je naknadno seštet. Izračun se izvede za vse poti med viri in sprejemniki vključno z odboji za posamezno meteorološko situacijo in nato ponovi za ostale meteorološke situacije. Za overovitev veljavnosti je bilo uporabljenih 120 meteoroloških razredov (osem razredov smeri vetra, trije razredi hitrosti vetra in pet razredov stabilnosti atmosfere), kasneje je bila razvita metodologija za zmanjšanje zapletenosti tega problema na izračun štirih razredov primernosti za širjenje zvoka, ki so določeni z ekvivalentnimi linearnimi gradienti. Klasifikacija razmer za širjenje zvoka je uporabna tako za napovedovalne modele, kot za meritve. Na koncu se izračuna dolgoročno raven hrupa za posamezen del dneva glede na prispevek posameznega meteorološkega razreda, ki je opredeljen s frekvenco pogostosti. Tri časovna obdobja so nato seštet z upoštevanjem pribitkov za večerni in nočni čas, s čimer

dobimo raven glasnosti zvoka dan-večer-noč ( $L_{DVN}$ ). Akustične lastnosti tal so opredeljene z razmeroma preprostim modelom za izračun impedance, ki sta ga zasnovala Delany in Bazley (1970). Vpliv tal je izračunan na podlagi teorije o širjenju zvoka za točkovne vire, pri čemer so uporabljene enačbe, ki temeljijo na pristopu Chiena in Soroke (1975). Za oceno uteži posameznega impedančnega razreda na liniji širjenja zvoka so upoštevane Fresnelove cone. Izvora zvoka sta postavljena na sredinsko linijo vozišča, nižji, ki označuje vir pnevmatik, 0,01 m od tal in višji, ki označuje lego izpuha, 0,3 m od tal za osebna vozila in 0,75 m za tovorna vozila.

Metoda omogoča upoštevanje detajlnih krajevnih popravkov, kot so na primer tip obrabnega sloja ceste, njegova starost in mokrost, frekvenčna porazdelitev pospeševanja in zaviranja, delež vozil z dizelskim motorjem, delež vozil z zimskimi pnevmatikami, povprečna teža vozila ali povprečna širina pnevmatik (Beuving in Hemsworth 2006).

Metoda oziroma že razviti računalniški model je za razvijalce komercialne programske opreme računanja ravni zvoka v naravi prosto dostopen, vendar ga ti zaradi zaprtosti (»black box«, onemogočeno spreminjanje in optimiranje) in izjemne počasnosti v primerjavi z ostalimi metodami še niso vključili v svojo standardno ponudbo. Pri modeliranju izbranih spremenljivk sem zato sledil zahtevam natančnosti te metode, vendar sem moral zaradi praktične izvedbe podatke pripraviti tudi v skladu s francosko metodo NMPB.

### 3.3 Določitev mreže točk sprejemnikov

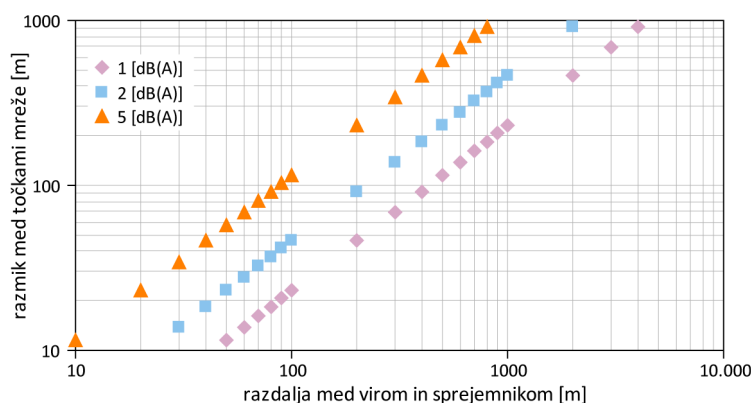
Običajno se mreža točk sprejemnikov določi bodisi z enakim razmikom za vse območje računanja (na primer 10 m mreža) ali pa se upoštevajo sprejemniki na (pred) fasadah. V prvem primeru dobimo prostorsko zelo natančen izračun, vendar poraba časa večinoma ne upravičuje izvedbe oziroma jo celo onemogoča. Velika gostota točk pri srednjih in velikih razdaljah od ceste (od nekaj 100 m naprej) je tudi nepotrebna, saj se raven zvoka spreminja počasi. V drugem primeru so izračuni relevantni le za ocenjevanje vpliva hrupa na pozidanih območjih. Zaradi omenjenih razlogov je treba točke sprejemnikov pred izvedbo izračuna prostorsko in številčno optimirati.

V splošnem mora biti mreža točk gostejša, kjer so spremembe ravni zvoka večje. Redkejša mreža je dovoljena na območjih s postopnejšim spreminjanjem ravni. V zelo preprostem modelu širjenja zvoka, kjer so zanemarjeni ostali vplivi, je prostorska spremenljivost ravni zvoka podana kot:

$$\Delta L = -\frac{10 \cdot \Delta d_i}{\ln(10) \cdot d}, \quad (3)$$

kjer je  $d$  razdalja med virom in sprejemnikom,  $\Delta d_i$  pa razdalja med točkama spremembe (Chiari et al. 2007, 47). Iz enačbe izpeljemo izračun za razdaljo med točkami mreže sprejemnikov:

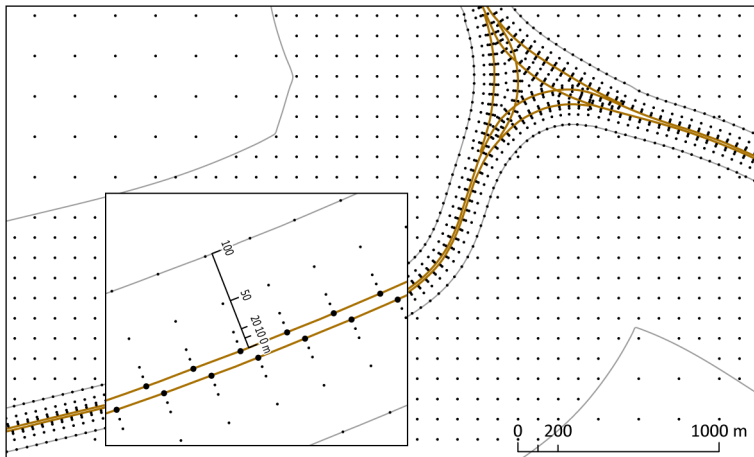
$$\Delta d_i = -\frac{\Delta L \cdot \ln(10) \cdot d}{10}. \quad (4)$$



Slika 4: Razmik med točkami mreže sprejemnikov kot funkcija razdalje za različne vrednosti za največje spremembe ravni hrupa 1 dB(A), 2 dB(A) in 5 dB(A) med točkami mreže (Chiari et al. 2007, 47).

Figure 4: Grid separation requirements for 1 dB(A), 2 dB(A) and 5 dB(A) maximum noise change between receivers (Chiari et al. 2007, 47).

Pri natančnejšem modelu širjenja so lahko spremembe krajevno mnogo večje, zlasti ob upoštevanju ovir. Pri takšnih modelih mora biti mreža točk zelo gosta blizu ceste in za ovirami, saj se raven zvoka za pregrado zelo hitro zniža. Kluijver in Stoter (2003, 89-92) priporočata, da so točke sprejemnikov blizu cestišča razporejene v manjšem razmiku pravokotno nanj ter v večjem razmiku dalj stran od cestišča in vzporedno z njim. Z optimiranjem razporeditve mreže sprejemnikov zmanjšamo čas računanja ter, kar je bolj pomembno, lahko bistveno izboljšamo interpolacijo izofon (črt, ki povezujejo iste ravni zvoka) in s tem interpretacijo vpliva hrupa.



Slika 5: Prostorsko spremenljiva mreža sprejemnikov za računanje hrupa. Na sliki so točke, ki potekajo pravokotno na cestišče, nameščene do razdalje 100 m, medtem ko so bile pri izračunu oddaljene do 200 m.

Figure 5: Spatially variable grid of receivers. The buffer used to compute illustrated receivers, perpendicular to the road, was 100 m, while 200 m was used for noise calculation.

Skladno z zgoraj navedenim sem mrežo točk sprejemnikov v svojem izračunu zasnoval tako, da so sprejemniki razmeščeni v razdalji, ki omogoča registracijo spremembe ravni zvoka med 1 in 2 dB (slika 5). Mreža točk sprejemnikov je razdeljena na več ravni. V 200 m pasu na vsako stran ceste so točke razporejene pravokotno na cestišče v stalni razdalji 10, 20, 50, 100, 150 in 200 m, vsakih 50 m vzdolž ceste. V razdalji med 200 in 1000 m so točke razporejene v pravokotni mreži vsakih 100 m, dalj od 1000 m pa vsakih 200 m. Dodatni sprejemniki so nameščeni na fasadah stavb.

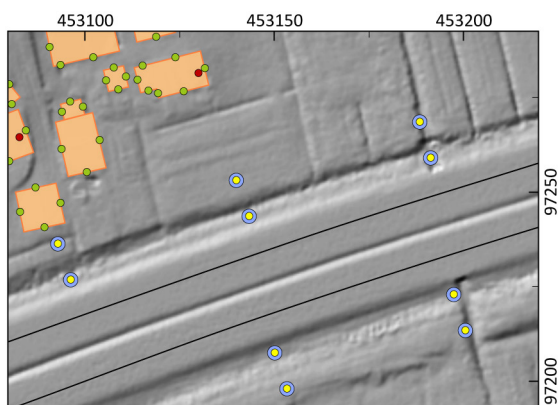
Mrežo točk, ki so postavljene pravokotno na cestišče, se izdelava samo v eno smer za posamezen pas vožnje, vendar jo je treba na določenih mestih (na primer na avtocestnem križu) zaradi nastalih prekrivanj zredčiti. Najenostavneje je to storiti samodejno, z zaporednimi pravili, tako, da odstranimo vse točke, ki:

- ležijo manj kot 10 m od ceste,
- so manj kot 40 m od ceste in ne sodijo v kategoriji 10 ali 20 m pravokotne oddaljenosti,
- so manj kot 90 m od ceste in ne sodijo v kategorije 10, 20 ali 50 m oddaljenosti,
- so manj kot 140 m od ceste in ne sodijo v kategorije 10, 20, 50 ali 100 m oddaljenosti,

- sodijo v kategorijo 200 m pasu, a niso bliže kot 1 m od roba tega pasu.

Gruče iste kategorije oddaljenosti odstranimo tako, da jih nadomestimo s centriidi. Za kategorijo 10 m oddaljenosti to velja, če so točke druga od druge oddaljene manj kot 10 m, za ostale pa manj kot 20 m. Odstranil sem še točke 100 m pravokotne mreže, ki so bile od točk 200 m oddaljenosti bliže kot 25 m.

Pri vseh izračunih sem za presojo vpliva hrupa na prostem višino sprejemnikov določil na 2 m od tal, pri dodatnem, testnem izračunu tudi na 4 m, za presojo vpliva na kakovost bivanja v zgradbah. Višine sprejemnikov sem določil z vplivnim območjem polmera 2 m in se na ta način izognil krajevnim popačenjem izofon zaradi lege sprejemnikov v manjši krajevni vdolbini, na primer jarku za odvodnjavanje (slika 6). Sprejemnike, ki so ležali znotraj stavbnih obodov, sem odstranil. Skupaj je bilo to približno 4 % točk.



Slika 6: Sprejemnike, ki so ležali znotraj oboda stavb sem odstranil (rdeči točki). Preostalim (rumene točke) sem višino določil s povprečno vrednostjo v vplivnem območju polmera 2 m (modro) ter se na ta način izognil krajevnim popačenjem izofon. Sprejemniki ob stavbah (zeleno) so bili dodani v programu za računanje jakosti zvoka.

Figure 6: Receivers lying inside building footprints were removed (red dots). In order to minimise local isofon distortions altitude of the rest (yellow dots) was calculated from average heights in a 2m buffer (blue). Receivers on facades (green) were added in the noise modelling software.



## 4 MODELIRANJE IZBRANIH SPREMENLJIVK

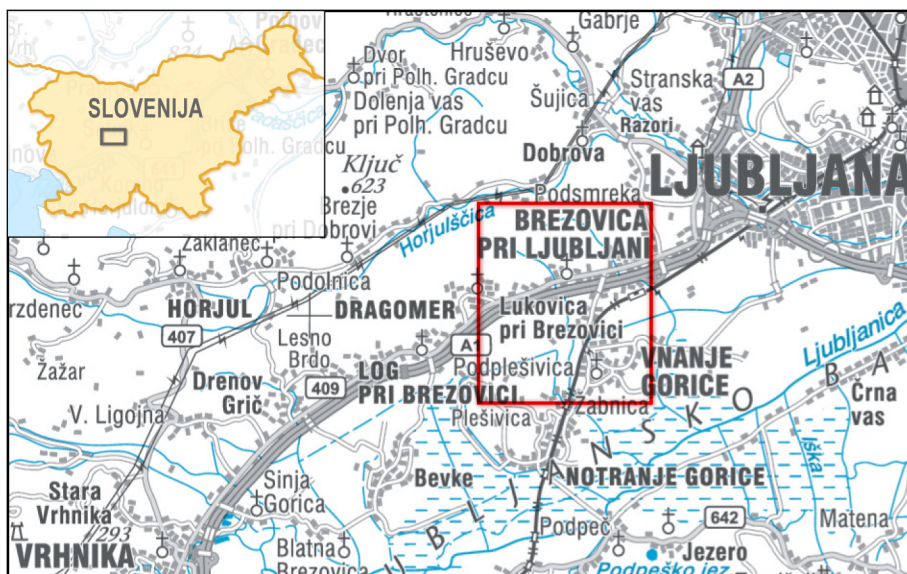
Natančno poznavanje lokacije objektov ter različnih okoljskih parametrov prostora je pri modeliranju jakosti zvoka v okolju prav tako pomembno, kot natančni algoritmi širjenja zvoka. Geografski informacijski sistemi se že sedaj v veliki meri uporabljajo za zajem, hranjenje in rokovanje s podatki, ki jih potrebujemo za kartiranje ravni zvoka. Eden od glavnih izzivov pri uporabi obstoječih podatkov je, kako ravnati v primeru, ko so ti nenatančni, nepopolni ali pomanjkljivi. Da bi izkoristili prednost novih metod v večji natančnosti in razširjenih zmožnosti modeliranja, je treba zbrati nove podatke oziroma obstoječe izboljšati do večje ravni detajlov (Beuving in Hemsworth 2006, 15). S tehnologijo in tehnikami daljinskega zaznavanja lahko tovrstne podatke zagotovimo tako na ravni manjših območij, kot na ravni regij in držav.

V tem poglavju so analizirane različne metode pridobivanja ustreznih spremenljivk. V preglednicah so navedene zahtevane natančnosti in uporabnost za modeliranje ali smiselnost spremljanja spremenljivk z daljinskim zaznavanjem z vidika časovne, položajne in višinske natančnosti, zmožnosti posodabljanja in stroška.

### 4.1 Študijsko območje in uporabljeni podatki

Izbrano študijsko območje je veliko 3,8 km krat 4,4 km (1672 ha) in leži na stiku Polhograjskega hribovja z Ljubljanskim barjem, zato ga označujeta tako razgibano gričevje na severu, kot domala popolna ravnina z osamelcema Plešivica (390 m) in Veliki vrh (375 m) na jugu. Višinski razpon znaša 250 m, od najnižje točke 288 m pri Podplešivici do 541 m visokega Vrha, del grebena Debeli hrib. Barjansko dno je gosto preprejeno z mrežo kanalov, ki se stekajo v Ljubljanico. Ob številnih jarkih in poteh so značilna drevesa in grmi. Najpogosteje so to črna jelša, vrbe, črni topol, dob in navadna breza. Na osamelcih so zaradi drugačnega reliefa, kamnin in prsti gozdne združbe drugačne od ravninskih predelov;

prevladuje gozd hrastov, belega gabra in prehlajenke (Lovrenčak in Orožen Adamič 1999, 380-391). Na severnem, gričevnatem delu, raste pretežno bukov gozd. Delež iglavcev je zelo majhen, smreke se pojavljajo na Plešivici ter v okolici Dragomera in Brezovice.



Slika 7: Lokacija študijskega območja.

Figure 7: The study area location.

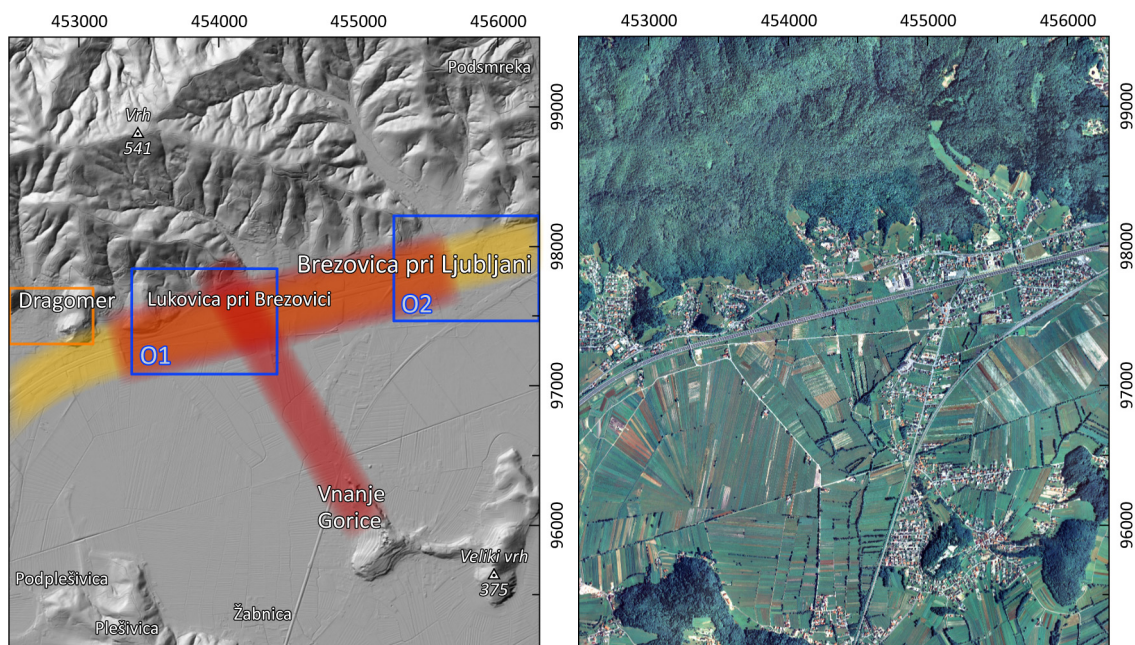
Naselja so stisnjena ob vznožja vzpetin, čeprav se vse bolj širijo na poplavne ravnice. Izrazita je hitra rast prebivalstva s priseljevanjem, večinoma iz Ljubljane, in preobrazba v značilna primestna spalna naselja. Nekoliko večja vas je le Brezovica pri Ljubljani (2600 prebivalcev leta 2009).

Območje prečka krak osrednjega slovenskega prometnega križa: avtocesta in železnica od Ljubljane čez Vrhniko in kraške planote na Primorsko. Avtocesta poteka neposredno ob in celo skozi naselja, delno je obdana s protihrupnimi ogradami.

Vsestransko razgibano in raznoliko območje je zelo primerno za raziskavo, ki obravnava preizkus različnih metod. Pri obdelavi podatkov zračnega laserskega skeniranja je pomembna geomorfološka raznolikost, različno gosta poselitev ter zaraščenost z gozdom, raznolika raba tal je zelo primerna za proučevanje metod izdelave impedančnih kart, prometna obremenitev pa ustreza študijam obremenitve s prekoračenimi ravnmi zvoka. Poleg tega sem območje izbral še na podlagi razpoložljivosti podatkov, zlasti bližnjih števcov prometa in podatkov laserskega skeniranja. Menim, da so rezultati preizkušanja



različnih postopkov obdelave zato reprezentativni, uporabni in dovolj robustni za kar najširši nabor poselitvenih in pokrajinskih tipov.



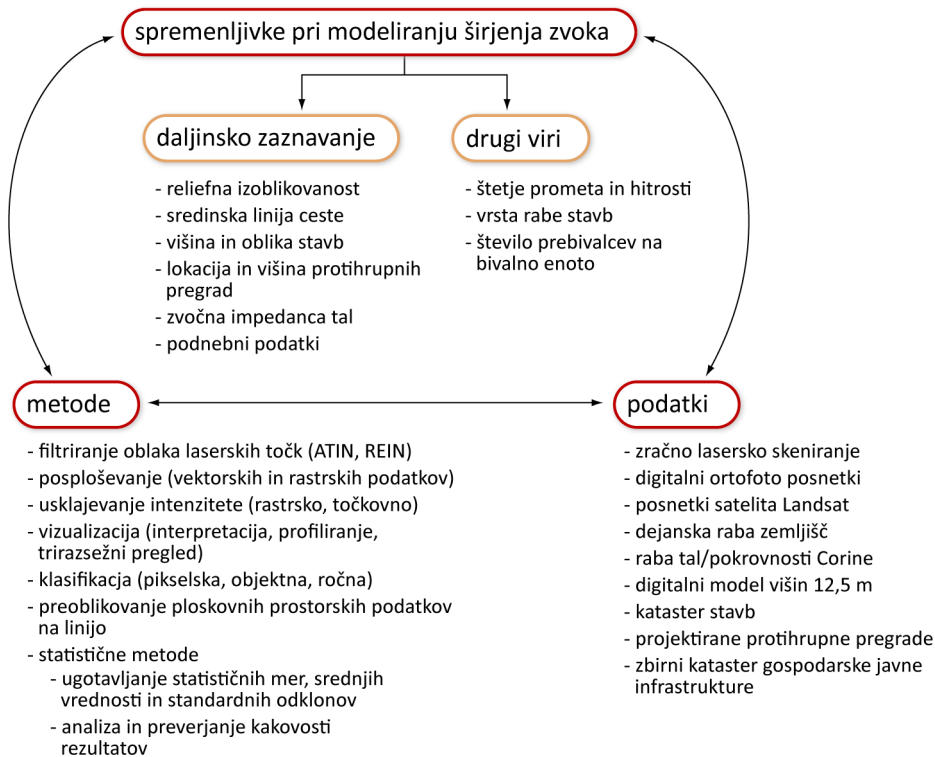
Slika 8: Reliefna izoblikovanost študijskega območja (levo) in posnetek ortofoto (desno). Z modrima pravokotnikoma sta označeni ožji preizkusni območji, z oranžnim preizkusno območje za filtriranje lidarskih podatkov. Z oranžnim pasom je nakazan potek snemanja AC Vrhnika – Brezovica, z rdečima Brezovica z okolico 1. Snemanje Brezovica z okolico 2 zajema celotno študijsko območje.

Figure 8: Relief morphology of the study area (left) and an orthophoto representation (right). The blue rectangles delimit the narrower study areas, the orange one the test area of lidar data filtering. Approximate data stripes of highway scanning and Brezovica with surroundings 1 scanning are shown as orange and red bands respectively.

Zaradi avtocesti vzporedne magistralne ceste s stalno lokacijo prometnega števca, hitrega razvoja in rasti naselij ter bližine glavnega mesta je območje primerno tudi za nadaljnje, obširnejše in bolj poglobljene raziskave s posameznih področij, ki vključujejo metode, procese in vidike daljinskega zaznavanja in/ali cestninjenja, tudi z gospodarskega stališča.

Številne spremenljivke, ki jih je potrebno zagotoviti za ustrezno modeliranje širjenja zvoka, zahtevajo preplet velikega števila raznolikih metod in kombinacij podatkov daljinskega zaznavanja. Kratak povzetek v nalogi obravnavanih metod in podatkov prikazuje slika 9. Osnovni podatki o zračnem laserskem skeniranju območja so podani v poglavju 4.1.1, postopek njihove obdelave za pridobitev podatkov o višinah in obliki terena ter objektov na njem pa v poglavju 4.2.1. Za izdelavo rastrskega modela višin sem uporabil prilagodljivo goščenje mreže neenakih trikotnikov (angl. adaptive TIN densification), ki dobro deluje na

pozidanih območjih, kombinirano z algoritmom REIN (angl. REpetitive INterpolation), ki izdelava natančen relief na strmih gozdnatih pobočjih. S podatki laserskega skeniranja, bodisi rastrskimi, bodisi točkovnimi, sem ugotavljal lomne linije reliefa (poglavje 4.3), natančno lego sredinske linije ceste (poglavje 4.4), podatke o obliki in višini stavb (poglavje 4.5) ter lego in višino protihrupnih pregrad (poglavje 4.6).



Slika 9: Diagram spremenljivk, ki jih potrebujemo pri modeliranju širjenja zvoka, ter podatkov in metod, ki sem jih uporabil oz. preizkusil za njihovo ugotavljanje. Podatkovni viri so navedeni v prilogi A.

Figure 9: Diagram of variables needed in noise modelling and methods and data needed for their assessment.

Poglavje 4.7 opisuje izdelavo impedančnih kart, primernih za uporabo tako po računski metodi Harmonoise kot NMPB. Karte so izdelane na podlagi študij, ki ugotavljajo povezave med zvočno impedanco tal in tipičnimi kategorijami pokrovnosti oziroma rabe. Uporabil sem samodejno klasifikacijo podatkov laserskega skeniranja (poglavje 4.7.1), pikselsko klasifikacijo posnetkov satelitskega sistema Landsat (poglavje 4.7.2), objektno klasifikacijo letalskih ortofoto posnetkov (poglavje 4.7.3) in obstoječi bazi Dejanska raba kmetijskih zemljišč (poglavje 4.7.4) in Corine (poglavje 4.7.5), ki sta bili izdelani z ročno fotointerpretacijo letalskih ortofoto podob oziroma podob sistema Landsat.

Podatkovni viri so navedeni v prilogi A.

### 4.1.1. Snemanje študijskega območja

Združene podatke ZLS treh snemanj študijskega območja je posredovalo podjetje Flycom. Izvedena so bila 21.11.2007, med 9:30 in 13:50 in pri vseh je bil uporabljen zvezni laserski skener Riegl LMS-Q560, nameščen na helikopterju. Osnovne tehnične značilnosti skenerja so (Riegl 2009):

- zvezno zaznavanje odbojev (»neomejeno« šttevilo zaznanih odbojev),
- vzorec skeniranja: vzporedne linije (skener z vrtečim poligonalnim zrcalom),
- divergenca laserskega žarka: 0,5 mrad,
- valovna dolžina laserskega žarka: bližnja infrardeča (1550  $\mu\text{m}$ ),
- zajem intenzitete: 16 bitni.

Podatki so bili ob prejemu že deloma obdelani, kar nakazuje standardni odklon nefiltriranih odbojev s cestišča, ki sem ga izračunal z odstranjenimi vozili z vzorčnimi pasovi širine 2 m in dolžine 4 m. Vzorčne pasove sem določil s presekom vplivnih območij ob sredinskih linijah voznih pasov in vplivnih območij ob točkah, ki sredinske linije opredeljujejo. Standardni odklon znaša 0,6 cm, kar pomeni, da so bili oblaki točk posameznih preletov registrirani na izbranega, osnovnega.

Preglednica 1 podaja osnovne značilnosti snemanj, katerih podatke sem uporabil, preglednica 2 pa nekatere metapodatke lidarskih podatkov ožjega študijskega območja O2. Ker so bili podatki snemanj združeni v skupnih datotekah in grafičnih podatkov o preletnih linijah nisem prejel, podatke o geografskem obsegu snemanj navajam opisno. Snemanje Brezovica z okolico 1 sestavljata po dve kratki preletni liniji vzdolž avtoceste med Dragomerom in Lukovico pri Brezovici ter nanju prečni med Lukovico in Vnanjimi Goricami. Podatki snemanja Brezovica z okolico 2 prekrivajo celotno študijsko območje, saj je bilo snemanje izvedeno med naselji Notranje gorice na jugu, Dobrova na severu, Dragomer na zahodu in zahodnim obrobjem Ljubljane na vzhodu. Snemanje AC Vrhnika – Brezovica zajema dve preletni liniji vzdolž avtoceste med obema priključkoma. Približen potek snemanj Brezovica z okolico 1 in AC Vrhnika – Brezovica podaja slika 8 levo.

Ustrezne preletne linije sem pri analizah, ki so jih zahtevale, rekonstruiral iz časovnih podatkov posameznih točk.

Preglednica 1: Snemalni parametri uporabljenih lidarskih podatkov.

Table 1: Scanning parameters of lidar data.

	Brezovica z okolico 1	Brezovica z okolico 2	AC Vrhnika - Brezovica
širina pasu snemanja [m]	350	700	350
prekrivanje pasov [delež] *	50 %	50 %	100 %
hitrost leta [kts]	40	50	30
hitrost oddajanja pulza [kHz]	180	120	200
povprečno število točk na m <sup>2</sup>	12,6	3,8	33,0
napaka GPS (x; y; z) [cm]	1; 3; 3	1; 3; 3	<1
geolociranost podatkov	Gauss-Kruegerjev državni koordinatni sistem	Gauss-Kruegerjev državni koordinatni sistem	Gauss-Kruegerjev državni koordinatni sistem

\* teoretično prekrivanje

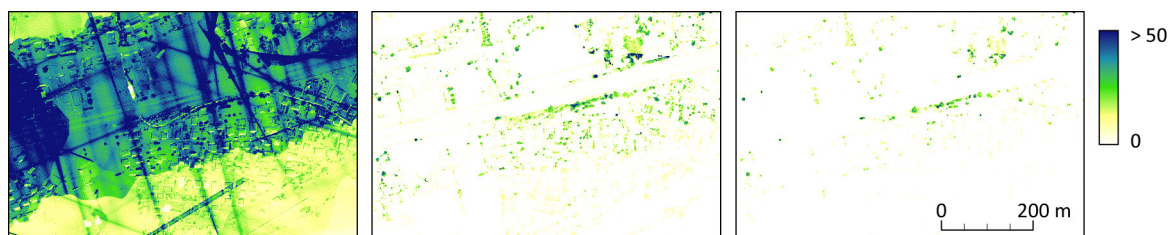
Preglednica 2: Nekateri tehnični metapodatki lidarskih podatkov ožjega študijskega območja O2.

Table 2: Lidar data technical metadata of the narrower study area.

velikost območja (x krat y)	1040 m krat 735 m
število točk	24.000.000
edini odboj [delež; število]	84 %; 20.200.000
prvi odboj [delež; število]	7 %; 1.600.000
vmesni odboj [delež; število]	2 %; 600.000
zadnji odboj [delež; število]	7 %; 1.600.000
število točk na m <sup>2</sup> (min; maks; povprečje)	0*; 643; 31,4
število serij	9

\* nekatere steklene in kovinske strehe, voda

Zaradi kombinacije večih snemanj je gostota odbojev zelo spremenljiva (slika 10).



Slika 10: Gostota odbojev (št. točk na m<sup>2</sup>) na delu ožjega študijskega območja. Slika vseh odbojev (levo; maks. 643), prvih (na sredini; maks. 205) in vmesnih odbojev (desno; maks. 146). Slika edinih odbojev (maks. 501) je zelo podobna sliki vseh odbojev, slika zadnjih (maks. 175) pa sliki prvih.

Figure 10: Density images of a part of the study area. All returns (left plate), first returns (middle plate), and intermediate returns (right plate). An only returns image is very similar to the all returns image and a last returns mage is very similar to the first returns image.

## 4.2 Reliefna izoblikovanost

Oblikovanost površja je ena izmed temeljnih naravnih značilnosti določenega območja. Je neposredno odvisna od naravnih in antropogenih dejavnikov, hkrati pa nanje pomembno vpliva. Rastrski model višin in iz njega izračunane informacije so osnovni podatkovni sloji v geografskih informacijskih sistemih, saj pogosto služijo kot edini vhodni podatek za razločevanje pokrajine (na primer Burrough et al. 2001; Gorevski et al. 2003; Perko 2007) ali kot del vhodnih podatkov za podporo okoljskih analiz (na primer Wilson in Gallant 2000; Komac 2003; Zakšek 2007), čemur pritrjujejo tudi številna področja uporabe (Podobnikar 2001, 47-48). S podatki daljinskega zaznavanja je mogoče v odvisnosti od senzorja, tehnike in razgibanosti reliefa izdelati različno dober model višin. Prevladujoče tehnike so fotogrametrija, zračno lasersko skeniranje (ZLS) in radarska interferometrija. Prednost daljinskega zaznavanja pred drugimi tehnikami izdelave, na primer interpolacijo iz obstoječih geodetskih podatkov, ki vsebujejo podatke o višinah, je enovitost izdelanega modela, poleg tega pa je mogoče pridobiti natančne podatke o višinah za razmeroma velika območja v kratkem času.

Preglednica 3: Zahtevana natančnost modela višin za modeliranje širjenja zvoka z metodo Harmonoise (Van Maercke 2007, 44).

Table 3: Terrain model accuracy requirements for noise modelling with Harmonoise method (Van Maercke 2007, 44).

	visoka natančnost <sup>9</sup>	srednja natančnost
splošna višinska natančnost [m]	0,5	1
višinska natančnost blizu nizkih virov [m]	0,25	0,5

---

<sup>9</sup> Visoka natančnost ustreza ravni strokovnih poročil, običajno omejenih na kritične situacije, ko je rezultat izračuna ravni zvoka odločilen za pravilno odločanje, na primer ko se spodbija modelirane ali merjene vrednosti. Srednja natančnost je opredeljena kot raven podrobnosti, ki je potrebna za oceno stroškov in koristi določenega posega ali akcijskega načrta, za ovrednotenje gradbenih načrtov nove infrastrukture ter za preverjanje usklajenosti z uredbami in predpisi (Chiari et al. 2007, 31-32). Za potrebe strateškega kartiranja hrupa v skladu z Evropsko direktivo o hrupu (2002/49/ES) na primer je dovolj že nizka raven natančnosti modeliranja.

Fotogrametrijo se tradicionalno in najbolj pogosto uporablja za pridobivanje topografskih informacij (na primer za izdelavo topografskih kart in baz) iz letalskih posnetkov, vendar so *fotogrametrične tehnike* uporabne tudi pri obdelavi satelitskih podob ter slik posnetih iz bližnje razdalje. Geometrična popačenja, ki jih vsebujejo surovi letalski in satelitski posnetki, lahko fotogrametrija učinkovito odstrani in ustvari zanesljive ortofoto podobe<sup>10</sup>. Z njo pa je mogoče pridobiti tudi druge geografske podatke, kot so model višin, topografske značilnosti, linijske karte in podobni (Leica Geosystems 2005, 291-295). V nadaljevanju se bom omejil na skupne značilnosti izdelave modelov površja iz *stereoparov optičnih visokoločljivih satelitskih sistemov* s prostorsko ločljivostjo boljšo od približno 2,5 m, katerih najbolj znani predstavniki so SPOT 5, Ikonos 2, QuickBird 2 in GeoEye 1 (OrbView 5), nekateri ostali pa IRS P5 (Cartosat 1) in IRS 2A (Cartosat 2), OrbView 3, WorldView 1 ter Eros B in C.

Kakovost in natančnost modela višin sta odvisni od prostorske ločljivosti sensorja, radiometrične kakovosti podob, pokrovnosti območja zanimanja, natančnosti kontrolnih točk za geokodiranje posnetkov, stopnje prekrivanja, tirnice snemanja in časovne oddaljenosti posnetkov, razmerja med bazo in višino (H/B), razlike v ločljivosti stereopara in ravni predobdelave, vsebovanih motečih pojavov (oblaki, megla in podobno) in dolžine senc (Krupnik 2000; Toutin 2003 in 2004; Jacobsen 2004). Primerjava stereo modelov višin z višinskimi podatki lidarja, ki jo je opravil Toutin (2004), razkrije razmeroma velika odstopanja, saj znašajo pri stopnji zanesljivosti 90 % približno 10 m. Analiza razkrije, da so (velike) napake večinoma v različnih sencah (gora, dreves ali zgradb) in so deloma posledica primerjave modelov površja z modelom terena. Rezultati so boljši pri primerjavi le golega površja (prsti in jezera) (preglednica 4). Pregled literature razkrije podobne rezultate pri drugih študijah kakovosti modelov višin, pridobljenih iz stereoparov satelitskih posnetkov. Na ravnem, odkritem terenu je višinska natančnost običajno med ena in dva krat ločljivost

---

<sup>10</sup> Ortofoto podobe so pridobljene v procesu ortorektifikacije. To je proces zmanjševanja geometričnih napak, ki nastanejo znotraj posnetkov zaradi orientacija sensorja, sistematične napake sensorja, premika zaradi izoblikovanosti površja in ukrivljenosti Zemlje. Meritve na ortopodobi so praktično enake meritvam na Zemeljski površini. Vsaka točka v podobi je videti, kot bi jo gledali iz položaja, ki je točno nad njo oziroma pravokotno na Zemljo.

senzorja, pogosto je tudi bistveno slabša (Di et. al, 2003; Jacobsen 2004; Ahmed et al. 2007; Buyuksalih et al. 2008). Priporočil o optimalni velikosti celice izdelanih modelov višin je v literaturi malo. Avtorji običajno uporabljajo velikost enako dvakratni ločljivosti senzorja, čeprav je pri tej ločljivosti lahko že prisotna močna soodvisnost med sosednjimi celicami (Buyuksalih et al. 2004, 6).

Preglednica 4: Statistični rezultati primerjave stereo modelov višin z višinskimi podatki lidarja na golih območjih (prsti in jezera); napake pri 68 % (LE68) in 90 % (LE90) stopnji zanesljivosti (Toutin 2004, 2128).

Table 4: Statistical results of comparing satellite stereo DEM with lidar data on bare ground (soil, lake); errors at 68 % (LE68) and 90 % (LE90) confidence level (Toutin 2004, 2128).

satelitski sistem	LE68 [m]	LE90 [m]
SPOT-5	2,2	5,0
Ikonos	1,5	3,5
QuickBird	1,2	2,8

*Radarska interferometrija (InSAR)* je razmeroma nova tehnika, s katero lahko iz parov radarskih satelitskih in letalskih posnetkov pridobivamo visokoločljive podatke o zemeljskem površju. Najpomembnejši področji njene uporabe sta izdelava digitalnih modelov višin in opazovanje majhnih premikov, še posebej na območjih, ki so s »klasičnimi« metodami slabo izmerjena. Pri interferometriji uporabljamo kompleksne radarske satelitske posnetke, ki poleg podatkov o amplitudi odboja na površju vsebujejo tudi fazo odbitega valovanja. Faza je odvisna od lastnosti opazovane površine in od dolžine poti med oddajno anteno, opazovano površino in sprejemno anteno. V primeru, da imamo posnetka istega območja, ki sta bila narejena iz rahlo premaknjenih tirnic, lahko z upoštevanjem geometrije gledanja določimo zvezo med interferogramom – fazno razliko obeh podob – in višinami na površju. Pri tem moramo paziti, da posnetka ustrezata zahtevam za interferometrično obdelavo, in sicer da sta narejena iz bližnjih tirnic in da se med zajetjema obeh podob ni pretirano spremenila fazna odbojnost oziroma katera od geofizikalnih lastnosti površja (Oštir 2006, 104). S posnetki nove generacije umetno odprtinskih radarskih satelitov (SAR) (Radarsat-2, TerraSAR-X, konstelacija Cosmo-SkyMed) s prostorsko ločljivostjo reda 1 m, je mogoče pri izdelavi modelov višin doseči položajno natančnost boljšo od petih metrov in višinsko natančnost nekaj metrov (Ferraiuolo et. al 2009).

*Lidarsko daljinsko zaznavanje* v strokovnih publikacijah zadnjih nekaj let zbuja vse več pozornosti. Tehnologija, ki je bila v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja razvita za vojaške namene in topografska merjenja, se intenzivno širi tudi na druga področja, na primer v energetiko, varstvo pred naravnimi nesrečami, kmetijstvo, gozdarstvo, rudarstvo, načrtovanje prometa in razvoja mest ter arheologijo (Ackermann 1999). Bistvo tehnologije je ponavljajoče se merjenje razdalj do nekega objekta z laserskim daljinomerom, s čimer dobimo prostorsko predstavitev tega objekta. Razdalja se preračuna iz časovne razlike med oddajo laserskega pulza in prejemom odboja. V primerjavi z večino optičnih sistemov daljinskega zaznavanja so meritve laserskega skenerja bistveno bolj podrobne (do nekaj deset odbojev na m<sup>2</sup>) in pozicijsko točne: absolutna napaka v navpični in vodoravni smeri je velikostnega reda 10 cm (Wehr in Lohr 1999), relativna pa znaša nekaj cm. V tem smislu so primerljive s kakovostnimi letalskimi fotogrametričnimi snemanji, pred katerimi pa imajo odločilno prednost – takojšnjo predstavitev tretje dimenzije za vsako izmerjeno točko. Lidar namreč kombiniramo z napravami za točno določanje položaja senzorja in mejenje orientacije laserskega žarka (GPS, angl. Global Positioning System, in INS, angl. Inertial Navigation System), ter tako dobimo absolutno locirane točke odboja. Zato v primerjavi z letalskimi fotosnemanji odpade potreba po ortorektifikaciji ali stereomodeliranju (Baltsavias 1999).



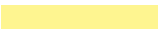
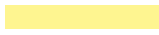







Na začetku širjenja uporabe ZLS so nekateri verjeli, da bo fotogrametrija do določene mere zastarala, vendar je medtem postalo jasno, da se tehnologiji dopolnjujeta (Brenner 2005, 188). Digitalna fotogrametrija namreč omogoča natančno merjenje posameznih, pomembnih točk in struktur – običajno določenih s strani operaterja. Kljub številnim raziskavam v preteklosti, njena največja slabost ostaja nizka raven samodejnosti procesov obdelave. Gostota točk lidarskih podatkov in stopnja ohranitve ostrih skokov v podatkih omogočata razmeroma visoko raven samodejnosti. Pomembnejša pomanjkljivost ZLS je nespremenljivo vzorčenje zemeljskega površja, saj ne omogoča neposredne usmerjene meritve določenega (dela) objekta. Zato je za pridobitev zelo natančnega rezultata z veliko mero samodejnosti mnogo obetavneje pristopa združiti (Brenner 2005, 188). Odličen pregled ZLS podajata posebna številka revije ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing (1999, 54 (2-3): 61-214) in knjiga Topographic laser ranging and scanning (Shan in Toth 2008).



Daljinsko zaznavanje z laserskim skenerjem večinoma opravljajo iz letal in helikopterjev ter satelitov (Dubayah et al. 1997), za posebne namene se uporabljajo terestrični laserski skenerji (Steinvall 2003), v zadnjih nekaj letih pa je zaznati tudi porast laserskih sistemov nameščenih na cestnih vozilih. Laserske instrumente med seboj ločimo po ključnih lastnostih, kot so valovna dolžina laserskega žarka, frekvenca pulzov, premer žarka in moč laserja, ki opredeljujejo njihovo namembnost (Wehr in Lohr 1999).

Preglednica 5: Uporabnost daljinskega zaznavanja za izdelavo modela višin.

Table 5: Applicability of remote sensing techniques and technologies for DEM extraction.

	višinska natančnost*	strošek	
letalska fotografija			
digitalna fotogrametrija			
visokoločljivi optični sateliti			
digitalna fotogrametrija			
visokoločljivi radarski sateliti			
radarska interferometrija			
zračno lasersko skeniranje			
filtriranje			
ustreznost	velika	srednja	majhna
			

\* časovna ustreznost in zmožnost posodabljanja sta z vidika reliefa nebitveni<sup>11</sup>

Omembe vredna značilnost je izjemno velika količina podatkov, ki jih lidar proizvede. To je do nedavnega predstavljalo eno od ovir širjenju njegove uporabe izven raziskovalnih krogov, saj sta »ročna« analiza podatkov in vizualna fotointerpretacija izvedljivi le za majhna območja in povsem nepraktični pri večkratnem posodabljanju zbirk podatkov, na primer trirazsežnih modelov mest na državni ravni. Dosežena moč računalnikov, zlasti pa razvoj učinkovitejših in bolj robustnih algoritmov za samodejno interpretacijo podatkov (Lohmann et al. 2000; Nardinocchi et al. 2003; Sithole 2005), sta pripomogla k širši uporabnosti tehnologije ZLS. Oblak točk, ki ga proizvede instrument, vsebuje trirazsežne podatke o zemeljskem površju, vključno z rastjem, stavbami ter drugimi naravnimi in antropogenimi

<sup>11</sup> Barvna shema pri tej in naslednjih podobnih preglednicah označuje doseganje kriterijev zahtevane natančnosti in ostalega ter ni primerna za rangiranje metod glede na »zbrano« število razredov velike ustreznosti.

elementi. V primeru izdelave modela reliefa odboji s teh objektov niso pomembni, zato jih je treba s filtriranjem ali segmentacijo izločiti iz izvornih podatkov (Hyypä et al. 2004). Med pomembnejše parametre z različnimi značilnostmi in zahtevami pri filtriranju sodijo razgibanost, poraščenost in pozidanost površja (Kraus in Pfeifer 1998; Jacobsen in Lohman 2003). Glavne ugotovitve primerjave različnih filtrov (Sithole in Vosselman 2004) so:

- površinski filtri opravijo nalogo bolje kot strukturni filtri,
- večina algoritmov slabo ohranja nezveznosti v zemeljskem površju (kar je velika težava v urbanem okolju),
- večina algoritmov je vezanih na določen tip pokrajine,
- napak 1. in 2. vrste<sup>12</sup> ne moremo zmanjšati z uporabo enega samega algoritma,
- objekti, ki so nekakšen podaljšek zemeljskega površja (na primer mostovi) morajo biti zaznani posebej.

Zato je za izboljšanje rezultatov nujno uporabiti kombinacijo različnih pristopov. Podrobnejši opis različnih filtrov je najti v Killian et al. (1996), Kraus in Pfeifer (1998), Vosselman (2000), Sithole in Vosselman (2004), Shan in Sampath (2005), Zhang in Whitman (2005), Kobler et al. (2007) ter Pfeifer in Mandlburger (2008). Posebna področja, kjer se uporablja svojstvene lastnosti laserskega skeniranja v samodejnih procesih, so izdelava reliefa pod gozdnim pokrovom in zaznavanje električnih daljnovodov.

Na kratko lahko povzamem, da je v idealnih razmerah s primernim georeferenciranjem z dodatnimi kontrolnimi točkami, na trdi podlagi, brez potrebe po odstranjevanju rastja in kakovostnimi tehnikami odstranjevanja šuma, mogoče doseči natančnost boljše od  $\pm 10$  cm.

---

<sup>12</sup> V statistiki je napaka 1. vrste zavrnitev ničelne domneve, ko ta velja, napaka 2. vrste pa sprejem ničelne domneve, ko ta ne velja (Košmelj et al. 2001, 80). Ker nekateri algoritmi filtriranja spremenijo lokacijo originalnih točk ali zapišejo rezultat v obliki celične mreže, so bili iz filtriranih podatkov izdelani modeli višin. Nato so bile z dobljenimi modeli višin primerjane točke referenčnih podatkov. Vse točke so bile zatem klasificirane kot pravilna gola tla, napaka 1. vrste, napaka 2. vrste ali pravilni objekt. Napake 1. in 2. vrste morajo biti zato razumljene v kontekstu primerjave višin referenčnega in filtriranega modela višin. Napaka 1. vrste nastane, ko algoritem zavrne točke, ki predstavljajo gola tla, napaka 2. vrste pa, ko sprejme točke, ki predstavljajo objekt (Sithole 2005, 41-42).

Na območjih z nizkim rastjem se pojavi sistematični premik navzgor, poveča se tudi naključna napaka. Vrednosti sta sicer zelo odvisni od tipa rastja, vendar zlahka dosežeta +10 cm za premik oziroma  $\pm 10$  cm za naključno napako. Pod gozdnim pokrovom in zaradi negotovosti pri definiranju ploskve terena, je natančnost modela višin v gozdu v najboljšem primeru  $\pm 20$  cm. Ne zadostno georeferenciranje običajno vodi do splošne natančnosti reda  $\pm 30$  cm. Če k temu pridamo še položajno napako v lokaciji odtisa laserskega žarka, je prispevek k napaki še  $\pm \sigma_p \cdot \tan(\gamma)$ , kjer je  $\gamma$  nagib reliefa in  $\sigma_p$  položajna natančnost, običajno reda (višina snemanja) / 2000 (Hyypä et al. 2001; Pfeifer et al. 2004; Kobler et al. 2007, 21; Pfeifer in Mandlbürger 2008, 330).

#### 4.2.1. Obdelava podatkov zračnega laserskega skeniranja

V nadaljevanju je obravnava obdelava podatkov zračnega laserskega skeniranja za pridobitev podatkov o reliefni izoblikovanosti.

##### uporabljeni podatki

- oblak točk zračnega laserskega skeniranja

##### izvedba

- zmanjševanje števila odbojev
- filtriranje oblaka laserskih točk
  - prilagodljivo goščenje TIN (ATIN)
  - večkratna triangulacija (REIN)
- ročna označitev grobih napak
- zamenjava območij z grobimi napakami s ponovno filtriranimi podatki
- posploševanje plastnic

Velika količina podatkov in posledično dolgotrajna izdelava modelov višin me je vodila k razmišljanju o *zmanjšanju števila odbojev*. Slednje se je izkazalo nujno tudi zaradi neenakomerne gostote odbojev z veliko ekstremnimi vrednostmi, ki na nekaterih mestih presegajo 2000 odbojev na  $m^2$ , saj trenutna izvedba filtrirnega algoritma REIN (REpetitive INterpolation, Kobler et al. 2007) v takšnih razmerah odpove (oziroma je potrebno zelo zmanjšati velikost računskega kvadrata, kar privede do še daljšega računskega časa, zaradi večje površine prekrivanja). Pri zmanjševanju gostote odbojev sem kot zahtevi postavil možnost izbire gostote in tipa odbojev ter način zapisa višine (najmanjša, srednja, najvišja).

Prvi način za zmanjševanje gostote je enostavno redčenje na osnovi tipa odboja, pri čemer zapišemo na primer vsak tretji edini odboj, vsak drugi prvi in zadnji ter vsak četrti vmesni odboj (uporabil sem lasten program, ki podatke tudi pripravi za vnos v REIN, sprogramiral ga je M. Sprogar). V enovitih pogojih snemanja ta način deluje dobro, pri zelo raznoliki

gostoti pa ne, saj na nekaterih območjih ne odstrani dovolj točk, na drugih pa preveč. Naprednejši način je zmanjševanje gostote točk z enovito celično mrežo, s katero »prekrijemo« oblak točk in v vsaki celici upoštevamo le odboj z najnižjo višino (program ALDPAT, International Hurricane Research Center). Ker odboji z najnižjo višino ne ustrezajo nujno ravnini ploskve terena, tudi ta rešitev ni povsem zadovoljiva, težava se pojavi še pri izdelavi modela površja (DMP), saj so pri tem zanimivi najvišji odboji. Kljub temu da v primeru podatkov z različno gostoto drugi način kakovostnejši rezultat.

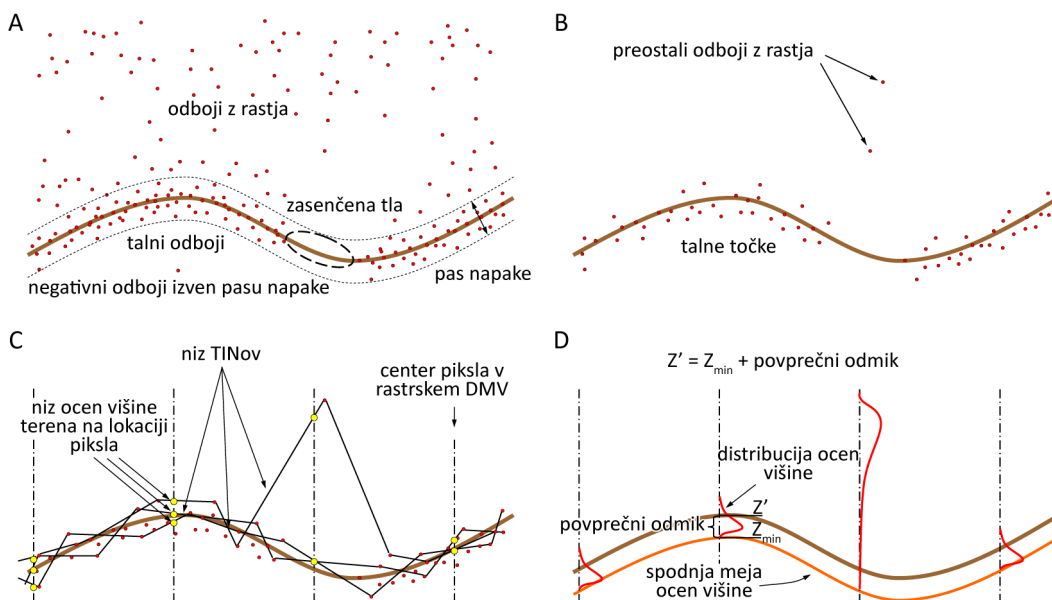
Čeprav nobeden izmed načinov ne ustreza postavljenim pogojem, sem vseeno opravil preizkus redčenja in analizo vpliva na kakovost izdelanega reliefa z obema<sup>13</sup>. Ugotovil sem, da je prvi način redčenja pri danih podatkih neprimeren, ker izdelani modeli višin niso zadovoljive kakovosti, saj redčenje odstrani tudi točke na območjih, kjer to ni potrebno oziroma je celo nezaželeno (kjer gostota talnih točk ne dosega 4 točke na m<sup>2</sup>), hkrati pa izjemne gostote ne zredči dovolj. Zato ga v nadaljnjem besedilu ne navajam.

Za *filtriranje oblaka laserskih točk* sem sprva uporabil algoritem REIN, ki zlasti na z gozdom zaraslem razgibanem terenu deluje zanesljiveje in natančneje kot do sedaj znani (Kobler et al. 2007). REIN se od drugih (determinističnih) algoritmov razlikuje po statističnem pristopu in izkoriščanju redundance v podatkih za izločanje motečih točk v trirazsežnem oblaku odbojev. Uporablja dve fazi filtriranja (slika 11). V prvi fazi se z eno izmed obstoječih metod filtriranja (običajno z geomorfološkim filtrom, vendar lahko uporabimo tudi katero drugo metodo) odstrani vse odboje, ki ležijo pod terenom in večino, vendar ne nujno vseh, odbojev, ki ležijo nad terenom. V drugi fazi so iz prvotno filtriranega oblaka točk odstranjeni še preostali ne-talni odboji ter izdelan rastrski model višin. Algoritem uporablja več ocen višine terena za vsako posamezno točko rastrske mreže, ki jih dobi z interpolacijo z okolišnjih točk odboja v mreži neenakih trikotnikov (TIN). Ocene višine se računajo na podlagi večih neodvisnih nizov vzorčnih odbojev, izbranih iz predhodno filtriranega oblaka točk. Kot vozlišča v TIN lahko nastopajo tudi odboji z rastja, ki s predhodnim filtriranjem niso bili odstranjeni. TIN je zelo hitra metoda za računanje ocen

---

<sup>13</sup> Ob koncu raziskave sem ugotovil, da naprednejši način redčenja omogoča zbirka orodij LASTools (Isenburg, M.), saj je možno opredeliti tako velikost celice, kot red odboja in razred klasifikacije.

višine točk rastrske mreže, vendar lahko uporabimo tudi druge načine interpolacije. Končne višine terena so določene s prištetjem povprečnega odmika spodnjim mejam distribucij višin, ki niso pod vplivom preostalih odbojev z rastja.



Slika 11: Delovanje algoritma REIN. Iz oblaka točk (A) v prvi fazi odstrani vse točke, ki ležijo pod terenom in večino odbojev nad terenom (B). V naslednji fazi iz preostalih točk iterativno izdeluje TIN iz vsakež naključno izbranega vzorca. Na ta način dobimo niz naključnih modelov višin in za vsakega izračunamo oceno višine terena na lokaciji piksla (C). Končne višine terena so določene s prištetjem povprečnega odmika spodnjim mejam distribucij višin (D) (prirejeno po Kobler et al. 2007).

Figure 11: REIN algorithm uses redundancy within the terrain error band (A). The result of the initial filtering stage (using, e.g., a slope threshold filter) are ground points with few remaining unfiltered vegetation points and no negative outliers (B). Repeated random selections of lidar points are used to build a set of TINs, out of which sets of elevation estimates are interpolated at the locations of DTM grid points (C). DTM elevations are approximated by adding global mean offset to the lower bounds of elevation distributions (D) (Kobler et al. 2007).

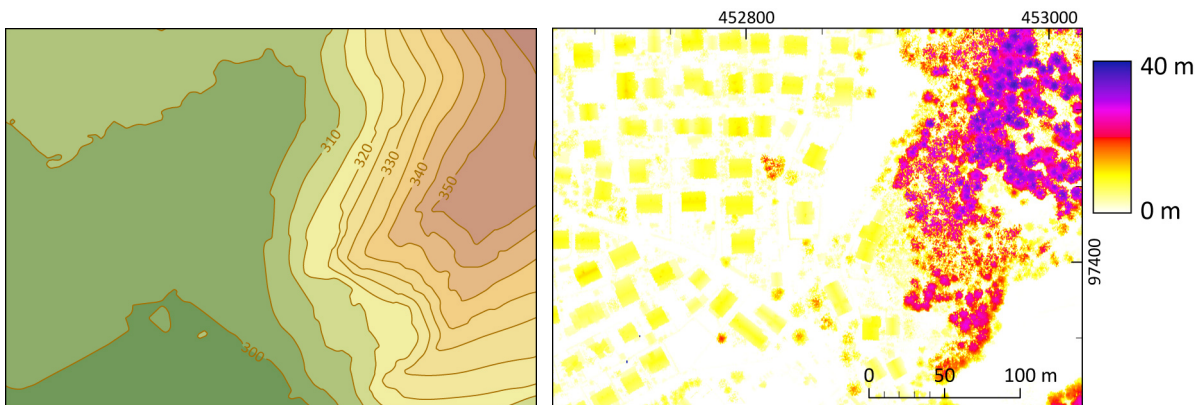
Izdelane modele višin sem primerjal vizualno na izbranem testnem območju velikosti 600 m krat 400 m, ki je del celotnega študijskega območja in obsega tako gozdnata pobočja, kot razmeroma gosto pozidavo s stanovanjskimi hišami; del tega območja prikazujta slika 12 in slika 13. Primerjal sem izračune med različnimi vhodnimi podatki (slika 14) in različnimi kombinacijami nastavitvev ter vodil pregled računskih časov (preglednica 6). Filtriranje oblaka laserskih točk običajne gostote (do nekako 20 točk/m<sup>2</sup>) je z vidika današnje strojne opreme sicer zahtevno opravilo, vendar na najzmogljivejših večjedrnih delovnih postajah izvedljivo v razumnem času. Pri večjih, »ekstremnih gostotah«, ki so posledica trenutne upočasnitve hitrosti leta helikopterja, se računski časi lahko (odvisno od izvedbe algoritma)

večkratno podaljšajo. Kot primer naj navedem, da je razlika v računskih časih z algoritmom REIN med posameznimi 100 m ali 200 m kvadrati tudi več stokratna.



Slika 12: Letalski ortofoto posnetek v ločljivosti 0,25 m (levo, GURS) in senčen model površja rastriranega oblaka vseh laserskih točk (največja višina v celici) s popravljenimi obodi stavb (desno), ki prikazujeta del območja na katerem sem preizkušal algoritme filtriranja.

Figure 12: An aerial orthophoto with 0.25 m resolution (left, GURS) and a shaded surface model of maximum heights of all lidar points with building footprints (right). The images present a part of a lidar filtering algorithms test area.



Slika 13: Višine (levo) in normiran model površja<sup>14</sup> (desno) istega območja, kot ga prikazuje slika 12.

Figure 13: Heights (left) and a normalised surface model (right) of the same region as shown on the figure 12

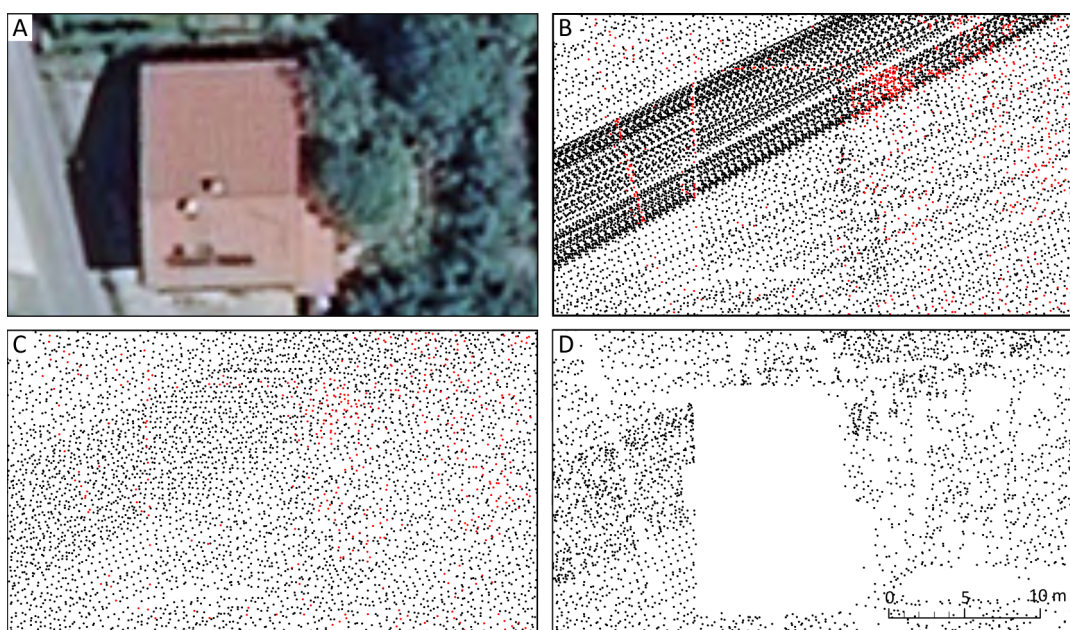
Namen naloge ni detajlna analiza različnih algoritmov filtriranja in njihovih lastnosti, vendar kljub temu navajam nekatere izsledke, ki utemeljujejo izbiro nastavitev. Primerjava reliefov izdelanih z REIN iz vseh (slika 15) in zredčenih odbojev (slika 16) (razmerje števila točk

<sup>14</sup> Normiran model površja (angl. normalized surface model, nDSM) je model razlike med modeloma površja in terena ter prikazuje višine objektov nad terenom.



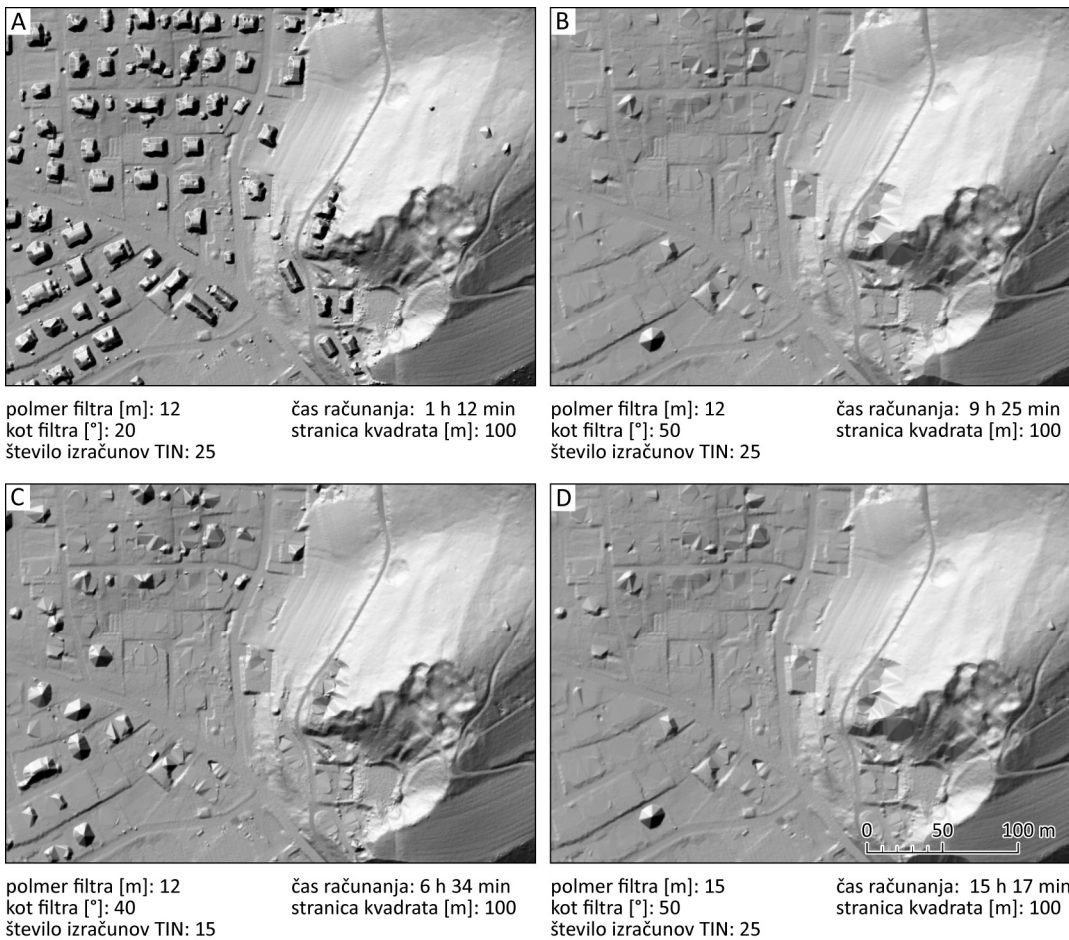
približno tri proti ena) razkrije, da so ob enakih nastavitvah na slednjem slabše definirani ostri robovi (na primer rob ceste na pobočju), manj je zelo majhnih izboklin (velikostnega reda piksel), stavbe so bolje odstranjene, vendar se mestoma pojavljajo nepravilne vdolbine, ki so posledica preostalih odbojev, ki ležijo pod pasom napake in jih REIN privzame kot pravilne.

Čas izdelave reliefa iz zredčenih točk je nekajkrat krajši (med približno šest do devetkrat) od časa izračuna z vsemi edinimi in zadnjimi odboji. Pri slednjem sem moral zaradi velike gostote točk stranico računskega kvadrata zmanjšati na 100 m, kar čas računanja podaljša še za približno četrtno. Čas triangulacije s 15 ponovitvami obsega približno 7 % časa obdelave, s 25 ponovitvami pa približno 10 %. Relief izdelan s 25 ponovitvami triangulacije ima manj zelo majhnih izboklin (velikostnega reda piksel), druge razlike so zanemarljive.



Slika 14: Ortofoto posnetek ločljivosti 0,25 m (GURS) (A), oblak točk vseh edinih (črne točke) in zadnjih odbojev (rdeče točke) istega območja (3,24 milijona točk na območju 600 m krat 400 m) (B), oblak točk, zredčen z enovito celično mrežo (0,33 m) (1,15 milijona točk, povprečno 4,8 točke/m<sup>2</sup>) (C) in oblak točk talnih odbojev, rezultat prve stopnje filtriranja (z goščenjem mreže neenakih trikotnikov) (2,13 milijona točk) (D). Na delu slike B je dobro viden pas zgoščenih točk, kjer je redčenje z enovito celično mrežo najbolj izrazito (C).

Figure 14: An orthophoto with a 0.25 m resolution (GURS) (A), only returns (black dots) and last returns (red dots) point cloud of the same area (3.24 million points on a 600 by 400 m area) (B), a point cloud with reduced point density (a point (if exists) every 0.11 m<sup>2</sup>, 1.15 million points, 4.8 pts/m<sup>2</sup>) (C), and a point cloud of ground returns as a result of filtering with adaptive TIN densification algorithm (2.13 million points) (D). A zone of very dense points is clearly visible on B, and effectively thinned on C.

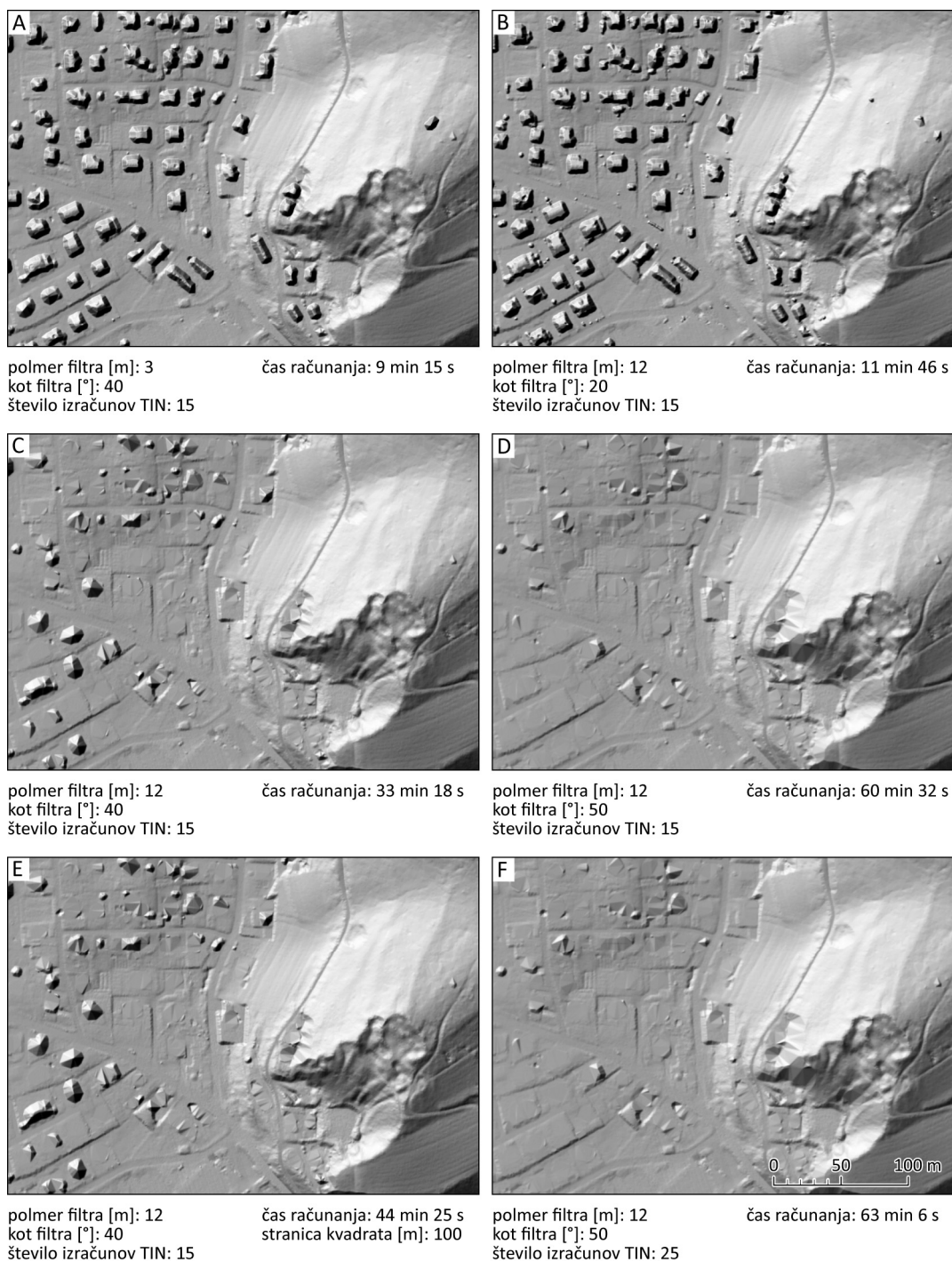


Slika 15: Senčen relief, izdelan z REIN z različnimi nastavitvami iz oblaka točk zadnjih in edinih odbojev. Vsi modeli imajo ločljivost 0,5 m.

Figure 15: Shaded reliefs of REIN-processed lidar point clouds of last and only returns.

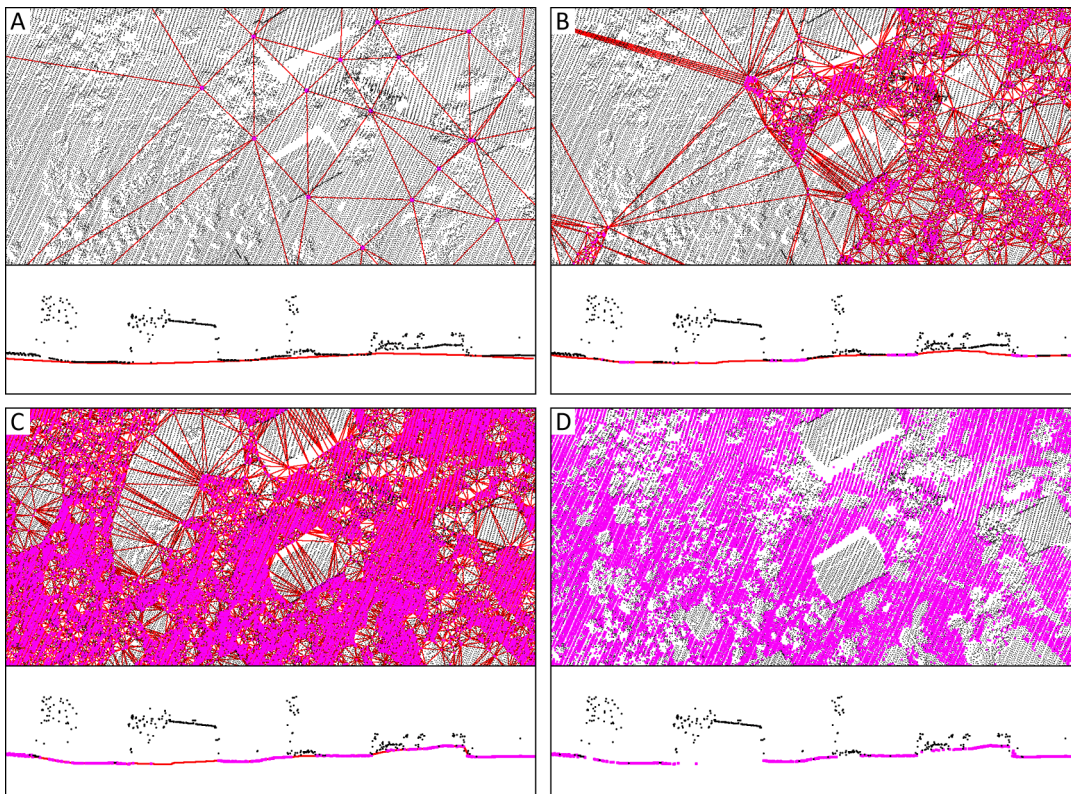
*Primerjava reliefov* izdelanih z različnimi nastavitvami pokaže, da REIN drevesa zelo dobro »odstrani«  
 že pri računsko zelo hitrih nastavitvah, na primer polmeru računskega stožca 3 m in njegovem kotu 40°, na drugi strani pa ima precej težav z odstranitvijo stavb, ki so zadovoljivo izločene šele pri nastavitvi nagiba stožca večjem od 50° in razmeroma velikem polmeru (med 12 m do 15 m, lahko tudi več, odvisno od velikosti stavb), kar posledično v veliki meri odstrani tudi ostre robove reliefnih oblik, na primer pri škarpah in nasutjih. Metodo sem zato izboljšal z zamenjavo prve stopnje filtriranja z algoritmom prilagodljivega goščenja mreže neenakih trikotnikov (TIN) (Axelsson 2000; izvedba v Terrascan) in nato rastrski model reliefa izdelal z REIN.





Slika 16: Senčen prikaz reliefa, izdelanega z REIN z različnimi nastavitvami, iz oblaka točk, zredčenega z enovito celično mrežo (dolžina stranice kvadrata 0,33 m).

Figure 16: Shaded reliefs of REIN-processed lidar point clouds with reduced point density (a point (if exists) every 0.11 m<sup>2</sup>).

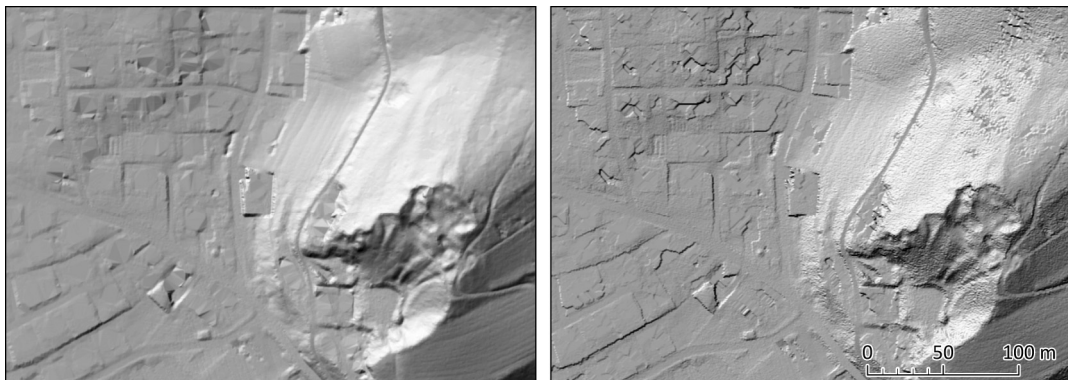


Slika 17: Prikaz delovanja algoritma goščenja TIN. Začetni (A) in končni (D) korak ter dve vmesni stopnji (B, C). Vijolične točke so talni odboji, rdeče črte pa povezave med njimi (TIN) (Axelsson 2000; slike prirejene po Soinen 2004).

Figure 17: An initial (A), final (D) and two intermediate stages (B, C) of filtering with TIN densification algorithm. Violet points are ground returns, red lines their connections (TIN) (Axelsson 2000; images based on Soinen 2004).

Algoritem prilagodljivega goščenja TIN (angl. adaptive TIN densification, ATIN) postopoma gradi reliefno ploskev tako, da ji pripisuje vedno več točk, ki ji pripadajo (slika 17). Prvotne točke so določene kot najnižje v celični mreži, katere velikost mora biti večja kot so največji grajeni objekti na obravnavanem območju. Trenutni niz točk s triangulacijo tvori referenčno ploskev. Z obravnavo preostalih nerazvrščenih odbojev nad navpičnim stolpcem trikotnika je vsakemu trikotniku pripisana dodatna talna točka. Analizira odmike kandidatnih točk od ploskve trikotnika. Odmiki so koti med ploskvijo trikotnika in robovi od oglišč trikotnika do kandidatne točke ter razdalja med kandidatno točko in ploskvijo trikotnika. Če je najdena točka z vrednostmi odmikov pod vrednostmi pragov, je razvrščena med talne odboje in algoritem nadaljuje z naslednjim trikotnikom. Nove vrednosti pragov so izračunane kot mediane, ocenjene iz histogramov pri vsaki ponovitvi. Postopek se ustavi, ko so razvrščene vse točke v trikotniku, je dosežena določena gostota talnih točk ali so vse

sprejemljive točke bliže reliefni ploskvi, kot naslednjemu pragu (Axelsson 2000). Največja prednost algoritma je njegova sposobnost obravnavanja nepovezanega površja, kar je posebno uporabna značilnost v urbanih območjih (Sithole in Vosselman 2003, 11).



število izračunov TIN: 25

čas računanja: 6 min 26 s

čas računanja: 9 s

Slika 18: Senčen relief, izdelan z REIN iz oblaka točk, filtriranega z goščenjem mreže neenakih trikotnikov, brez dodatnega filtriranja (levo) ter prikaz neposredno rastriranega enakega oblaka točk (najmanjša vrednost v celici, interpolacija praznih celic) (desno).

Figure 18: Shaded relief of REIN-processed lidar point cloud, pre-filtered with adaptive TIN densification algorithm (left plate), and directly rasterized same point cloud (minimum value in a pixel, interpolation of empty pixels) (right plate).

S tem sem združil prednosti obeh algoritmov, torej dobro delovanje v urbanem okolju (ATIN) in na gozdnatem nagnjenem terenu (REIN). Z večkratno triangulacijo rastriran relief je tudi primernejši za nadaljnjo obdelavo, kot relief, pridobljen z neposrednim rastriranjem (slika 18). Končni relief sem izdelal z naslednjimi nastavitvami REIN:

- 200 m stranica kvadrata računanja z 10 m prekrivanjem,
- 0,5 m prostorska ločljivost reliefa,
- brez dodatnega filtriranja,
- 0,02 % izločenih točk (negativnih ekstremnih vrednosti), izračunanih s sedmimi sosedi,
- 25 ponovitev triangulacije na 23 % vzorcu odbojev.

Filtriranje oblaka točk za celotno območje je trajalo približno 20 dni, rastriranje z večkratno triangulacijo (druga faza REIN) še 9 ur in 35 minut, medtem ko operaciji računanja območij prekrivanja in združevanja slojev trajata še vsaka po približno eno uro.

Preglednica 6: Časovna primerjava obdelav z različnimi nastavitvami.

Table 6: Comparison of processing times with different REIN settings.

	št. nabora nastavitvev <sup>1</sup>	stranica kvadrata [m]	ločljivost reliefa [m]	polmer <sup>2</sup> [m]	kot <sup>2</sup> [°]	št. sosedov <sup>2</sup>	izločene točke [%]	št. TIN	trajanje obdelave <sup>3</sup>
originalni podatki									
(edini in zadnji odboji)									
testno območje <sup>4</sup>	1	100	0,5	12	20	80	0,2	25	1 h 12 min
testno območje	2	100	0,5	12	50	80	0,2	25	9 h 25 min
testno območje	3	100	0,5	15	50	80	0,2	25	15 h 17 min
testno območje	4	100	0,5	12	40	80	0,2	25	6 h 55 min
testno območje	4	100	0,5	12	40	80	0,05	15	6 h 34 min
odboji, zredčeni z enovito celično mrežo (0,33 m)									
(edini in zadnji odboji)									
testno območje	5	200	0,5	3	40	80	0,05	15	9 min
testno območje	6	200	0,5	10	40	80	0,05	15	23 min
testno območje	4	200	0,5	12	40	80	0,05	15	33 min
testno območje	7	200	0,5	12	20	80	0,05	15	12 min
testno območje	8	200	0,5	12	50	80	0,05	15	1 h 1 min
testno območje	4	200	1,0	12	40	80	0,05	15	31 min
testno območje	9	200	0,5	12	40	40	0,05	15	36 min
testno območje	10	200	0,5	12	50	80	0,05	25	1 h 3 min
testno območje	4	100	0,5	12	40	80	0,05	15	44 min
talni odboji, rezultat filtriranja z ATIN									
testno območje	1	200	0,5	12	20	80	0,2	25	11 min
testno območje	4	200	0,5	12	40	80	0,2	15	1 h 30 min
testno območje	11	200	0,5	/	/	/	0,2	25	6 min
celotno območje	11	200	0,5	/	/	/	0,2	25	9 h 35 min
filtriranje celotnega območja z ATIN									približno 20 dni

<sup>1</sup> Številka kombinacije nastavitvev, prikazanih v preglednici. Kombinacija vsebuje vse nastavitve razen velikosti kvadrata računanja, ločljivosti izhodnega rastra in deleža izločenih točk. Ker je slednji zelo majhen, razlika na hitrost izračuna nima zaznavnega vpliva. Kombinacija štiri je primerjalna glede časov med različnimi vhodnimi podatki. Navedenih je le nekaj izbranih kombinacij nastavitvev, skupaj sem jih preizkusil več kot 40. Pri vseh navedenih izračunih so negativni odboji izven pasu napake računani s sedmimi sosedi, delež točk, uporabljenih v vsakokratnem izračunu TIN, pa je 23 %. Vplivna cona kvadratov računanja je pri vseh izračunih 10 m.

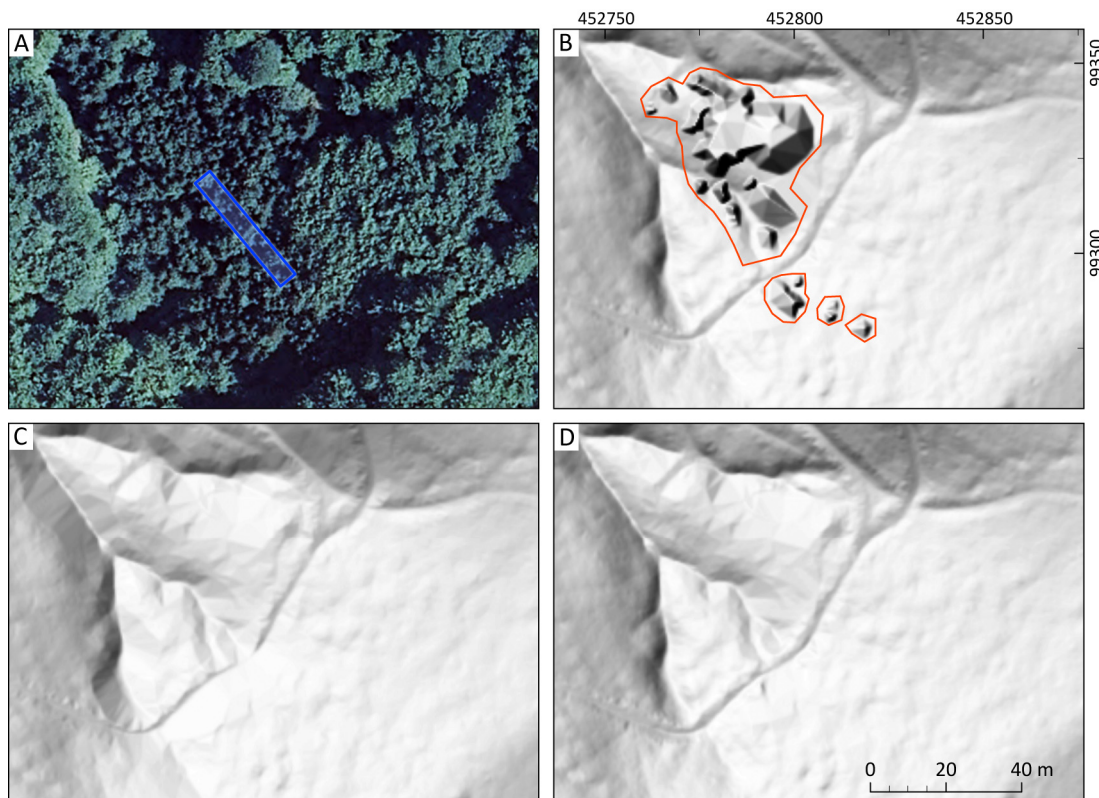
<sup>2</sup> Nastavitve za morfološki filter.

<sup>3</sup> Izračuni so bili opravljeni na računalniku s procesorjem Intel Xeon 3,6 GHz s štirimi jedri in 8 GB RAM. Ker je večina programov obdelave uporabljala eno samo jedro, so podani časi, kot bi bili ob tovrstnem računanju. Časi izračuna območij prekrivanja in združevanja v skupen sloj niso upoštevani, saj so pri manjših območjih



zanemarljivi (približno sekunda na računski kvadrat) pri celotnem območju (3800 m krat 4400 m) pa trajata obe operaciji vsaka približno uro.

<sup>4</sup> Testno območje je veliko 600 m krat 400 m in vključuje tako gosto pozidana zemljišča, kot gozd na strmem terenu.

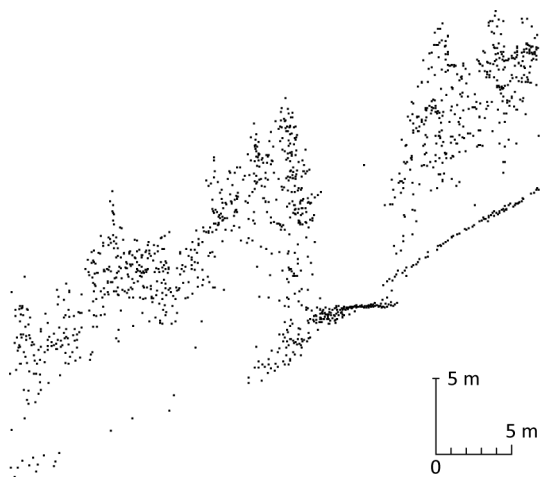


Slika 19: Odstranitev grobih napak, ki so posledica gostega smrekovega nasada, lepo vidnega na ortofoto posnetku (A). V gostem smrečju laserski žarek ne doseže tal, kljub gostoti 15,5 točke/m<sup>2</sup>. Grobe napake modela reliefa sem na vsem območju proučevanja ročno označil (B) in jih nadomestil z reliefom, izdelanim iz predhodno filtriranega oblaka točka (z ATIN) in dodatnim, razmeroma agresivnim, filtriranjem z REIN (polmer 12 m, kot 50°, število TIN 25) (C). Sloja sem kombiniral z zveznim prehodom na območju prekrivanja, zato prehodi med njima niso opazni (D). Na ortofoto posnetku (0,25 m, GURS) je označena lokacija profila, ki ga prikazuje slika 20.

Figure 19: Elimination of gross errors that result from a dense pine stand, clearly visible on an orthophoto (A). In dense pinery lidar pulse does not reach the ground despite 15.5 pts/m<sup>2</sup> scanning density. Gross relief errors were delimited by hand (B) and replaced by a relief derived from ATIN-filtered point cloud additionally filtered and processed with REIN (radius 12 m, angle 50°, number of TINs 25) (C). Transitions between relief layers are not visible because they were combined by a continuous transition on a defined buffer zone (D). A location of a profile from the figure 20 is shown on the orthophoto (0.25 m, GURS).

Na celotnem študijskem območju so na reliefu mestoma opazne grobe napake, ki so posledica pomanjkanja talnih odbojev zaradi gostih smrekovih nasadov (slika 19). V gostem smrečju laserski žarek ne doseže tal, zato nastanejo območja brez talnih odbojev (slika 20). V danem primeru so velika med 20 in 1400 m<sup>2</sup>. Z manjšimi prazninami ni težav, te se

pojavi pri večjih prazninah, saj ATIN, kot tla privzame nižje vmesne odboje, če so od tal odmaknjeni manj, kot določajo nastavitve algoritma. Tovrstna območja sem ročno označil in nadomestil z reliefom, ki sem ga izdelal iz oblaka točk, dodatno filtriranega z geomorfološkim filtrom, vgrajenim v REIN. Nastavitve so bile razmeroma agresivne (polmer 12 m, kot 50°, število TIN 25), saj sem želel odstraniti prav vse nepravilne oblike. Reliefa sem kombiniral z zveznim preходом na vplivnem območju 5 m.



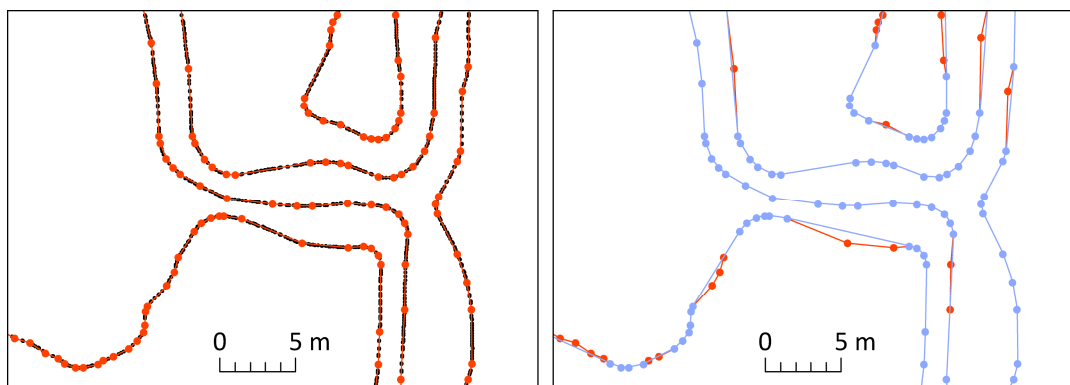
Slika 20: Profil dolžine 35 m na katerem je v levem delu lepo vidno pomanjkanje talnih odbojev, kljub širini profila 5 m in povprečni gostoti 15,5 točke/m<sup>2</sup>. Oblike krošenj so dobro razpoznavne, prav tako lokacija gozdne ceste.

Figure 20: A 35 m long profile where lack of ground returns is visible despite the 5 m width of the profile and 15.5 pts/m<sup>2</sup> scanning density. Spruce tree crowns and a forest road are easily recognisable.

Pri računanju širjenja zvoka so privzeta ravna oziroma povprečena tla, brez manjših reliefnih oblik. Chiari et al. (2007, 30-31) so na podlagi večjega števila naključnih profilov terena z neravninami s standardnim odklonom 1 m izračunali in potrdili, da elementi hrapavosti reliefa sicer uvedejo pomembno razpršenost rezultatov, vendar so v povprečju ti še vedno zelo podobni izračunu z ravnimi tlemi. Zato se v programih za računanje jakosti zvoka največkrat uporablja *predstavitev reliefa s plastnicami*.

Plastnice z višinsko razliko 1 m sem pripravil iz modela višin ločljivosti 0,5 m, ki sem ga predhodno filtriral s filtrom mediane in Gaussovimi filtrom velikosti petkrat pet pikslov (2,5 m krat 2,5 m). Po pretvorbi sem moral samodejno določiti in nato ročno odstraniti nekatera presečišča (stike dveh plastnic enake višine), ki so posledica zelo majhnih neravnin (velikosti nekaj pikslov). Pri pretvorbi modela višin s tako dobro prostorsko ločljivostjo plastnice označujejo številne točke, ki h kakovosti opisa linije ne prispevajo. Nekateri

programi za računanje jakosti zvoka imajo postopek za posploševanje plastnic že vgrajen, vendar nad kakovostjo ni vrednostnega nadzora, saj je običajno uporabljen algoritem odstranjevanja točk (Douglas-Peucker), upravljan z drsnikom. Sam sem za hitro prvotno redčenje točk uporabil ta isti algoritem, z največjim dovoljenim odmikom 0,05 m (slika 21, levo) in nato posploševanje z algoritmom poenostavljanja krivulj (Wang-Muller) z dolžino linije referenčne krivulje 2 m. Algoritma sta podrobneje opisana na strani 116. Temu je sledilo odstranjevanje vseh linij, krajših od 12 m, ki tvorijo poligon s površino manjšo od  $6 \text{ m}^2$ , z višinsko razliko manjšo ali enako 1 m. S slednjim postopkom je bilo odstranjenih 31,6 % plastnic. Končno sem plastnice še enkrat posplošil s poenostavljanjem krivulj z dolžino linije referenčne krivulje 5 m (slika 21, desno). Celotni postopek je količino vozlišč zmanjšal domala dvajsetkrat (preostalo jih je 5,5 %).



Slika 21: Posploševanje plastnic. Na levi sliki so točke plastnic izdelane iz zglajenega 0,5 m lidarskega reliefa (črno) ter točke in plastnice po opravljenem posploševanju z algoritmom odstranjevanja točk (Douglas-Peucker) z največjim dovoljenim odmikom 0,05 m (oranžno). Na desni sliki so slednjim dodane točke in plastnice njihovega posploševanja z algoritmom poenostavljanja krivulj (Wang-Muller) z dolžino linije referenčne krivulje 5 m (modro).

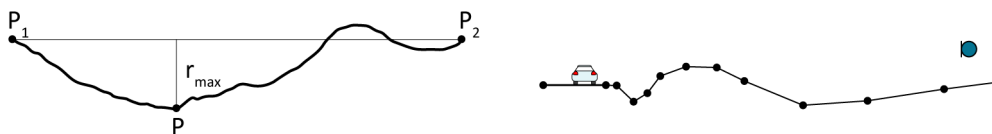
Figure 21: Contour line generalization. The left plate presents contour vertices generated from a filtered lidar DEM (black) and contours and vertices as a result of generalization with a point remove (Douglas-Peucker) algorithm with maximum allowable offset 0.05 m (orange). On the right plate are the latter and a result of generalization with bend simplify generalization (Wang-Muller) with a 5 m length of reference bend baseline.

Plastnice sem dodatno razredčil na hribovitih območjih, saj je tam metoda izračuna hrupa manj natančna oziroma celo neveljavna, umerjena je namreč za ravninska območja. Poleg tega so ta območja domala nenaseljena. Tako sem upošteval 5 m plastnice na območjih, ki ležijo več kot 330 m visoko. Pri obravnavi večjih regij bi bilo smiselno uporabiti naprednejše redčenje, ki upošteva parametre, pomembne za širjenje hrupa ter njegov vpliv na okolico, na primer oddaljenost od bivališč in obravnavanih cest, pokrovnost oziroma rabo tal ter nagib in

nadmorsko višino reliefa (reliefno razgibanost). Kot primer segmentacije reliefa Nota et al. (2005, B1) navajajo načelo najmanjšega odklona (slika 22), pri katerem nova talna točka postane tista z najmanjšo pravokotno razdaljo od linije, ki povezuje prvo in zadnjo talno točko. Talne točke med virom in sprejemnikom se dodajajo zaporedoma, dokler največja razlika v višini ( $r_{maks}$ ) in največja dolžina segmenta ( $d_{seg}$ ) ne ustrežata spodnjima enačbama ( $d$  je oddaljenost od vira v metrih).

$$r_{maks} \leq \begin{cases} 0,1 & d \leq 50 \\ 0,002 \cdot d & 50 < d < 500 \\ 1 & d \geq 500 \end{cases} \quad (5)$$

$$d_{seg} \leq \begin{cases} 1 & d \leq 20 \\ 0,05 \cdot d & 20 < d < 200 \\ 10 & d \geq 200 \end{cases} \quad (6)$$



Slika 22: Princip najmanjšega odklona za ugotavljanje nove talne točke (levo) in primer segmentiranega terena (desno) (Nota et al. 2005, B1).

Figure 22: Maximum deviation principle for new ground point determination (left plate) and an example of segmented relief (right plate) (Nota et al. 2005, B1).

### 4.3 Lomne linije terena

V podpoglavju so proučene metode obdelave modela višin, ki pripomorejo k natančnejši določitvi lomnih linij terena.

#### uporabljeni podatki

- rastrski model višin zračnega laserskega skeniranja in iz njega izračunani:
  - analitično senčenje reliefa
  - navpična ukrivljenost
  - delež vidnega neba

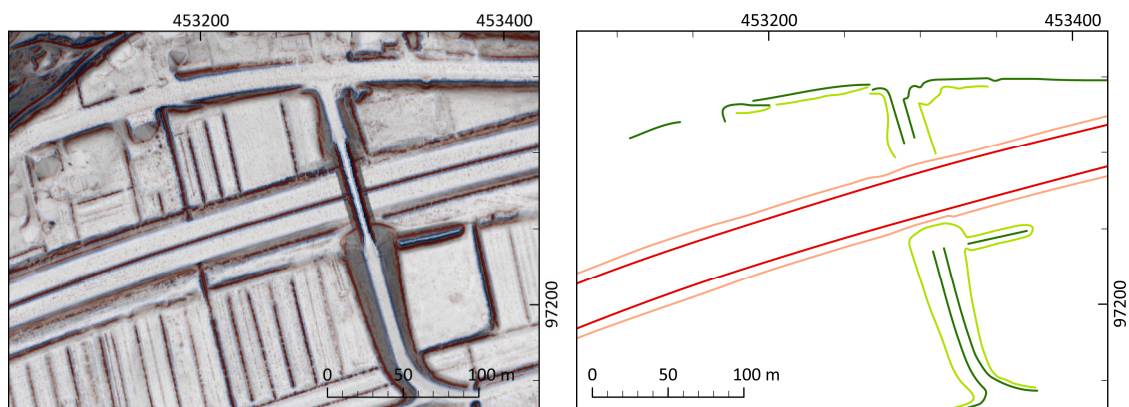
#### izvedba

- vizualna interpretacija

Lomne linije so značilne skeletne oziroma strukturne črte, ki lomijo ploskev površja. Lahko so prelomnice, razvodnice, dolinske ali grebenske črte. Spodnji in zgornji rob nasipa, bankine, slemena, prehod med cestno infrastrukturo in naravnim terenom ter vrhovi hribov



so za širjenje zvoka bolj pomembni kot rahlo razgiban relief ali pobočja z enakomernim nagibom. Van Maercke (2007, 75) za metodo Harmonoise navaja, da dodatno modeliranje lomnih linij ni potrebno v primeru, ko je višinska natančnost reliefa povsod boljša od 1 m, saj je že v samem algoritmu vgrajeno natančno preračunavanje vpliva reliefa na pot zvoka. V primeru metode NMPB je vpliv lomnih linij eksplicitno določen zato jih je treba opredeliti, saj zmanjšujejo jakost zvočnega valovanja, četudi »vidnost« med virom in sprejemnikom ni neposredno ovirana (Braunstein in Berndt 2008, 176). Pomembnejše so tiste, ki ležijo bližje viru hrupa ali sprejemnika. Zelo pomembne so tudi lomne linije, ki označujejo robove cestišča, ko ta ni v isti ravnini, kot okolica. Na podlagi tega sem določil lomne linije terena izbočenih oblik z relativno višinsko razliko večjo od dveh metrov v ožjem pasu ob cestiščih (200 m od sredinskih linij voznih pasov) in posebej robove nasutja oziroma vkopa avtoceste. Oba podatka sta orientacijska, saj sem sledil naravni oblikovanosti reliefa in linij nisem prekinjal, kjer se na primer značilen rob nasipa oddalji za manjšo razdaljo ali koder ima nasip na krajši razdalji manjšo relativno višinsko razliko. Določil sem samo tiste lomne linije, ki ležijo nad krajevno višino cestišča. Boljšo vizualno razpoznavnost lomnih linij sem dosegel s prekrivanjem izvedenih rastrskih slojev senčenega reliefa, ukrivljenosti reliefa in deleža vidnega neba (slika 23).



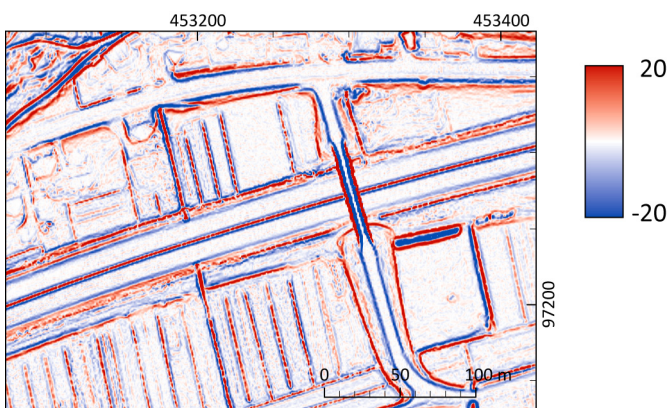
Slika 23: Kombinacija rastrskih slojev za pomoč pri vizualni interpretaciji lomnih linij (levo) in lomne linije (desno). Pri modeliranju širjenja zvoka so najpomembnejše lomne linije na izbočenih robovih v smeri proti opazovani cestni infrastrukturi (temno zeleno) in tiste, ki opisujejo zgradbo cestnega telesa (rdeče in oranžno).

Figure 23: A combination of raster layer for visual interpretation of relief breaklines (left) and interpreted breaklines (right)

*Analitično senčenje reliefa* običajno uporabljamo za lažjo predstavljalnost reliefa in povečevanje njegove razpoznavnosti tudi osebam, ki za delo s prostorskimi podatki niso

posebej izurjene. Sence so eden izmed osnovnih psiholoških dejavnikov vidnega zaznavanja prostora, saj v predstavo o prostoru vnesejo plastičnost in globino, kar nam omogoča prepoznati obliko teles in njihove medsebojne odnose. Mogoče ga je enostavno in hitro izračunati, za prikaz pa je največkrat izbrana sivinska barvna lestvica. Običajno je model višin senčen z azimutom  $315^\circ$  in višinskim kotom  $45^\circ$ , kar ustreza standardni osvetlitvi delovnega prostora – običajno imamo na delovni mizi svetilko, ki je postavljena pred in ne za nami. Ker smo navajeni na ta način osvetlitve, nam analitično senčenje z azimutom blizu juga vzbuja tako imenovani psevdoefekt – doline zamenjamo z grebeni in vdolbine z vrhovi. Največji omejitvi analitičnega senčenja sta slaba razpoznavnost detajlov v temnih sencah in nerazpoznavnost linearnih struktur, ki ležijo v smeri senčenja. Če senčenje izvedemo v več smereh, omogočimo s primerjavo rezultatov razkritje vseh objektov in povečamo kontrast rezultatov (Kokalj et al. 2008, 324-325).

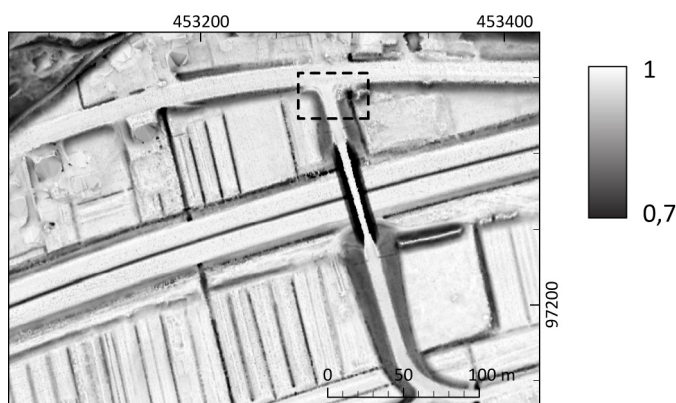
*Ukrivljenost reliefa* sem izračunal kot drugi odvod ploskve reliefa, torej naklon naklona reliefa. Upošteval sem le navpično ukrivljenost (slika 24), torej ukrivljenost v smeri največjega nagiba, ki se običajno računa v študijah erozijskih procesov in odtekanja, saj vpliva na pospeševanje oziroma zaviranje toka (Selby 1985, Hrvatini in Perko 2002). Pozitivne vrednosti rezultatov ukrivljenosti pomenijo izbočene oblike (konveksne – hribi, grebeni), negativne vrednosti vbočene oblike (konkavne – doline, vrtače), pri navpični ukrivljenosti pa obratno. Pred izračunom ukrivljenosti sem za izločitev najmanjših variacij v reliefu, model višin prevzorčil na ločljivost 1 m.



Slika 24: Navpična ukrivljenost reliefa. Prikazana je različica modela višin, pri kateri nadvoz čez avtocesto še ni bil odstranjen.

Figure 24: Profile surface curvature. A bridge over the highway has not been removed on the presented version of the elevation model.

Najprimernejša mera za izražanje *deleža vidnega neba* je prostorski kot (Zakšek 2006; Zakšek in Oštir 2008, 316). Prostorski kot poljubnega predmeta z izbranega opazovališča je količnik med površino  $S$  krogelne površine, ki ima polmer  $R$  enak oddaljenosti opazovališča do površine ( $\Omega = k \cdot S / R^2$ ). V prejšnji enačbi ima  $k$  vrednost  $1 / 2\pi$ , s čimer pripišemo nebesni polobli prostorski kot ena. Zaloga vrednosti tako določene mere leži na intervalu  $[0, 1]$ . Vrednosti blizu 1 pomenijo, da je vidna skorajda celotna polobla, kar velja za izpostavljena območja, na primer ravnine, vrhove in grebene, medtem ko vrednosti blizu 0 označujejo globoke vdolbine in vznožja strmih dolin, kjer nebo skorajda ni vidno (slika 25). Dober približek deleža vidnega neba lahko izračunamo z ocenjevanjem višinskega kota obzorja v več smereh. Po tem, ko določimo višinski kot v izbranem številu smeri  $n$ , izračunamo delež vidnega neba kot seštevek vseh deležev neba v vsaki smeri:  $\sum_i (1 - \sin \gamma_i) / n$ , kjer je  $\gamma_i$  višinski kot obzorja v smeri  $i$ . Tako določen in prikazan delež vidnega neba je uporaben v različnih znanstvenih vedah in disciplinah, pri katerih so pomembne tehnike prikaza digitalnega modela višin in samodejne tehnike določevanja oblik.



Slika 25: Delež vidnega neba, izračunan na razdalji 5 m v 8 smereh. Črtkan pravokotnik označuje lokacije naslednjih slik.

Figure 25: A sky-view factor image computed with a 10 m search radius in 8 directions. Dashed rectangle displays the location of subsequent images.

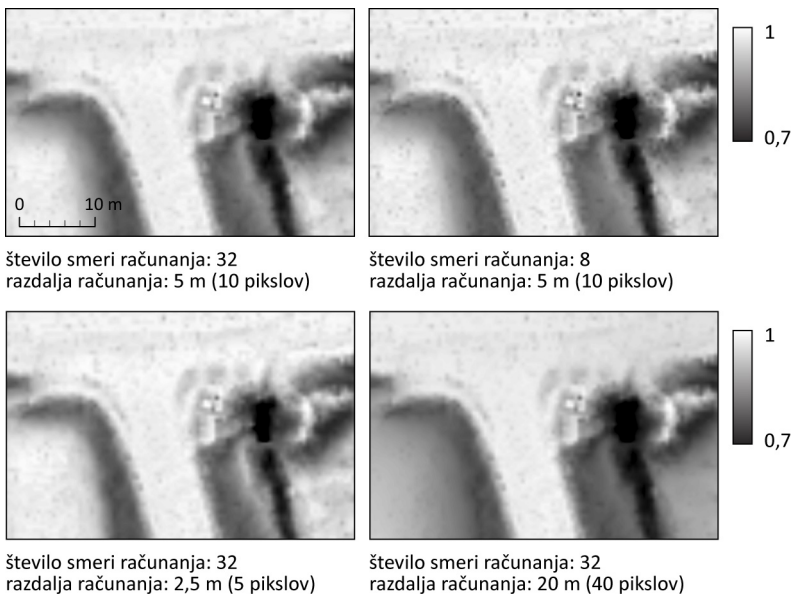
Ker je izračun deleža vidnega neba računsko zelo zahtevna operacija, sem preveril kakšen vpliv imajo različne nastavitve na prepoznavnost reliefnih oblik. Slabšanje ločljivosti vhodnih podatkov (reliefa) ima poleg neposrednega – očitno slabše ločljivosti rezultata –, na delež vidnega neba tudi posreden vpliv, saj se spreminjajo njegove vrednosti – zmanjša se razpon in s tem kontrastnost torej berljivost rezultata. V primeru zmanjšanja ločljivosti iz 0,5 m na 2 m z bilinearnim prevzorčenjem (slika 26) se na primer najmanjša vrednost poveča

iz 0,33 na 0,46, povprečje pa iz 0,93 na 0,94. Pri ugotavljanju lomnih linij reliefa (in še bolj protihrupnih pregrad) je razlika pomembnejša za natančno lociranje meja, kot samo razpoznavnost oblik.



Slika 26: Primerjava podob deleža vidnega neba izračunanega na razdalji 5 m v 32 smereh iz modelov reliefa različne ločljivosti: od leve proti desni 0,5 m, 1, m in 2m.

Figure 26: A comparison of sky-view factor images computed with a 10 m search radius in 32 directions from terrain models of different resolutions; from left to right 0.5 m, 1 m, and 2 m.

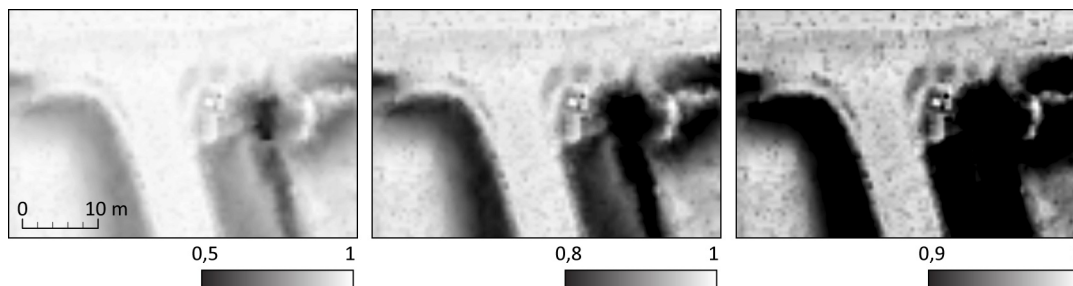


Slika 27: Primerjava podob deleža vidnega neba izračunanega z različnimi nastavitvami.

Figure 27: A comparison of sky-view factor images computed with different settings.

Med deležema vidnega neba izračunanima v 32 in 8 smereh so vizualne razlike komajda opazne, najbolj v bližini zelo majhnih (reda nekaj pikslov) visokih objektov (na primer kot posledica preostalih odbojev z rastja) in na ostrih robovih izbočenih oblik (na primer stavb, pri modelu površja), saj se prvi spreminja bolj zvezno. Na razpoznavnost objektov to ne vpliva. Izračun deleža vidnega neba temelji tudi na upoštevanju iskanih razdalji horizonta. Ker območje vpliva na rezultat, so rezultati pri večjem iskalnem radiju bolj posplošeni.

Nasprotno lahko kratek iskalni radij uporabimo za prikaz in klasifikacijo krajevnih morfoloških oblik (slika 27). Pri tem je ključno razmerje med redom velikosti izbranega objekta in ločljivostjo modela višin.



Slika 28: Primerjava podob deleža vidnega neba izračunanega na razdalji 5 m v 32 smereh in prikazanega z različnim raztegom histograma.

Figure 28: A comparison of sky-view factor images computed with a 10 m search radius in 32 directions and presented with a different histogram stretch.

Po izbiri optimalnih nastavitev računanja ima največji vpliv na vizualno interpretacijo deleža vidnega neba razteg histograma, s katerim »izoliramo« objekte, ki jih želimo prepoznati. Ker so vrednosti zelo zgoščene, običajno se jih precejšnja večina nahaja na intervalu nad 0,9, prilagajamo spodnjo mejo in tako skrivamo oziroma odkrivamo podrobnost v konkavnih oblikah oziroma povečujemo razlike med konkavnimi ter konveksnimi oblikami in ravninami (slika 28). Ravno slednje skupaj z dobrim prikazom ozkih izbočenih oblik omogoča dobro prepoznavnost robov in s tem interpretacijo lomnih linij ter, pomembneje, natančno lociranje vršnih delov protihrupnih pregrad.

Ker so protihrupne pregrade mestoma zgrajene neposredno na robu nasutja cestišča, sem lomne linije uskladi z njihovim potekom. To sem storil tako, da vedno potekajo za protihrupnimi pregradami, gledano v smeri od cestišča.

*Lomne linije sem določil* ročno, kljub temu, da obstaja nekaj načinov njihove (pol)samodejne opredelitve. Tako sem se odločil, ker so ti v raziskovalni fazi in (še) niso operativno delujoči oziroma vključeni v dosegljivo programsko opremo ali pa je po njihovi uspešni izvedbi potrebna bolj ali manj obsežna, v veliki meri ročna, poobdelava (na primer združevanje prekinjenih linij in brisanje neprimernih ali kratkih linij).

Metode samodejne opredelitve lahko v grobem ločimo na tiste, ki delujejo na že izdelanem modelu višin, bodisi v rastrskem zapisu ali TIN, in tiste, ki delujejo na oblaku točk. Metoda,

ki jo predstavi Brügelmanna (2000), je reprezentativna za prve. Opiše celoten postopek obdelave od rastrskega modela višin do posplošenih vektorskih linij, ki temelji na določevanju mejnih pragov drugemu odvodu reliefa (ukrivljenosti). Avtorica predlaga filtriranje z Gaussovimi filtrom, določevanje homogenosti ukrivljenosti, omejevanje nemaksimalnih vrednosti (angl. non-maxima suppression) in tanjšanje. Sledijo pretvorba v vektorske linije, posplošitev vodoravnih koordinat s kubičnimi zlepci in pripis višin z modela višin. Primerjava tako izračunanih lomnih linij s fotogrametrično opredeljenimi pokaže, da so razlike reda velikosti natančnosti fotogrametričnega zajema ( $35\% < 0,25\text{ m}$ ,  $60\% < 0,5\text{ m}$ ,  $80\% < 1\text{ m}$  in  $92\% < 1,5\text{ m}$ ). Tipična težava podobnih pristopov je deterministična določitev mejne vrednosti ukrivljenosti upoštevanih lomnih linij. Yokoyama in Chikatsu (2006) jo naslavljata z vpeljavo histograma ploščatosti (angl. histogram flatness).

Metoda trirazsežnega modeliranja lomnih linij iz oblaka točk laserskega skeniranja (Briese 2004; Briese in Pfeifer 2008a), za delovanje ne potrebuje predhodno izdelanega modela višin. Deluje samodejno ali polsamodejno. V slednjem primeru je treba pripraviti dvorazsežni približek lomne linije. Temelji na parnem preseku robustno ocenjenih ploskovnih elementov vzdolž lomne linije. Ploskovni elementi so ocenjeni iz talnih odbojev v bližini lomne linije, vpliv točk na položaj lomne linije upada z večanjem višinske razlike. Odboji, ki ne pripadajo reliefu so označeni z metodo robustne interpolacije (Kraus in Pfeifer 1998). Za zmanjšanje truda z izdelavo približka celotne lomne linije je bil vpeljan koncept postopne rasti linije. Temelječ na prvotnem dvorazsežnem segmentu linije, je končna lomna linija določena s postopnim širjenjem naprej in nazaj od predhodno določenih segmentov, dokler je določitev znotraj ekstrapoliranih ploskev uspešna ali dokler je ocenjena prekinitev reliefa (lom) dovolj velika (to je kot med parom ploskev). Za metodo je značilna dobra kvantitativna določljivost kakovosti rezultatov (Briese in Pfeifer 2008b). Kombinacija ročne označitve pomembnih lomnih linij in njihova samodejna določitev jo naredi posebej primerno za pripravo podatkov za modeliranje ravni zvoka.

Podatkovno bazo lomnih linij je treba obnavljati le po potrebi, ob večjih posegih v prostor, na primer gradnji večjih infrastrukturnih objektov (prometnic, daljnovodov) ali nasipov. Pri tem ima ZLS pomembno prednost pred drugimi sistemi, saj je s stroškovnega vidika za tovrstno opazovanje zelo ugoden.



## 4.4 Sredinska linija ceste

Pri detajlnih študijah se uporablja po ena linija vira zvoka za vsak vozni pas, pri študijah srednje natančnosti pa po ena linija za vsako smer vožnje, pri čemer ustreza sredinski liniji voznega pasu. Sredinski liniji voznih pasov sem zajel ročno iz DOF25, čeprav bi ju bilo prav tako mogoče iz slike intenzitete, saj so talne označbe lepo razvidne. Točke so bile samodejno zgoščene na manj kot vsakih 50 m. Primerjava z linijo sloja državnih cest (Zbirni kataster gospodarske javne infrastrukture), ki poteka po črti med voznim in prehitevalnim pasom poda povprečno oddaljenost 1,85 m s standardni odklonom 0,58 m za obe smeri vožnje oziroma 2,28 m za smer proti Ljubljani in 1,41 m za smer proti Primorski. Največja razlika je 3,11 m. Do razlike pride zaradi relativnega premika linij v ovinku pri Lukovici pri Brezovici, spričo katerega se na odseku proti Primorski »uradna« linija približa sredinski črti voznega pasu, v nasprotni smeri pa se od nje oddalji. Glede na oddaljenost linij od jarka, ki loči avtocestna odseka in je na lidarskem reliefu lepo viden, in primerjavo s sliko intenzitete, je napaka na strani uradnih evidenc. Prostorsko razporeditev oddaljenosti prikazuje slika 29.

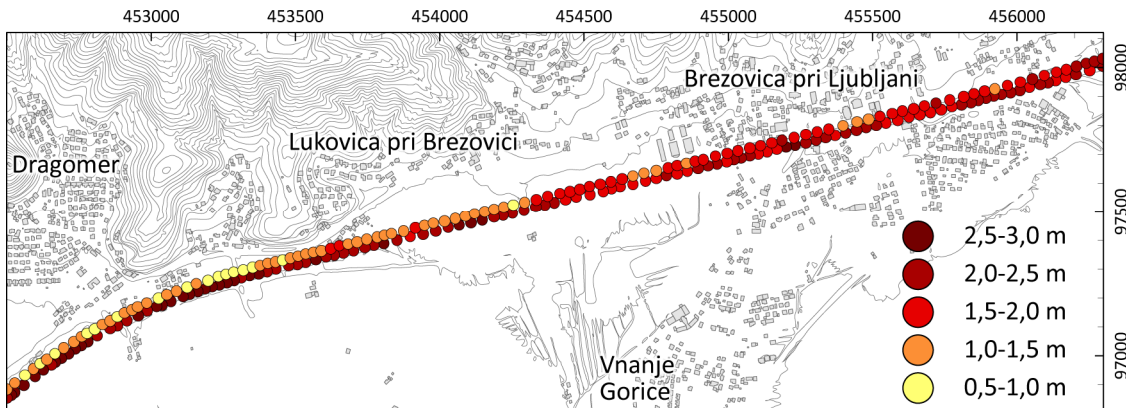
Preglednica 7: Zahtevana natančnost modela cestne infrastrukture (Van Maercke 2007, 49).

Table 7: Road infrastructure model accuracy requirements (Van Maercke 2007, 49).

	visoka natančnost	srednja natančnost
položajna natančnost [m]	1	2,5
skupna širina cestišča [m]	1	2,5
višina brežin [m]	0,5	1
nizke ovire blizu cestišča [m]	0,25	0,5
lastnosti obrabnega sloja	merjene	splošne

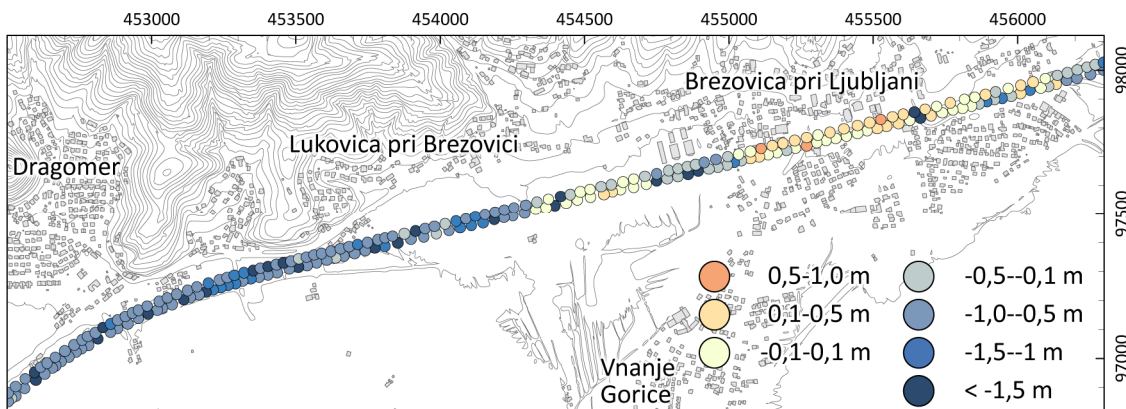
V študijah širjenja zvoka v Sloveniji se običajno uporabljajo podatki modela višin ločljivosti 12,5 m (DMV 12,5 m). Za primerjavo lidarskega modela višin in DMV 12,5 m je pomembno, da je bil slednji izdelan tudi na podlagi baze podatkov državnih cest (Podobnikar et al. 2004, 97-103) torej privzema njihovo natančnost. Baza podatkov državnih cest podaja položajno (vodoravno in navpično) najbolj natančne in točne informacije o cestah v Sloveniji. Njihova višinska natančnost je 0,9 m v ravninah. Za potrebe izdelave DMV 12,5 m so bile linije, prvotno zapisane v trirazsežni obliki, pretvorjene v običajen zapis shapefile z nadmorsko višino kot atributom. Osnova za interpolacijo ustreznega DMV so bile zgoščene točke, zapisane največ 10 m narazen ter višino med 0 in 2200 m. Z vizualnim

pregledom je bilo ugotovljenih več grobih napak, zato so bile točkam, ki so od reliefa odstopale za več od določene meje glede na tip površja (za ravnine 3,5 m), višine prirejene. Zaradi šuma, ki se je pojavljal zlasti ob avtocestah, je bil uporabljen še pas prehoda, ob avtocestah širok 70 m.



Slika 29: Prostorska razmestitev oddaljenosti sredinske linije voznega pasu, zajete s 25 cm ortofoto posnetka, od linije ceste iz Zbirnega katastra gospodarske javne infrastrukture.

Figure 29: Spatial distribution of driving lane centreline distances to the road centreline from the Cadastre of public infrastructure.



Slika 30: Prostorska razmestitev razlik v višinah med 12,5 m reliefom modela GURS in lidarskim reliefom na samodejno določenih točkah vzdolž sredinske linije voznega pasu.

Figure 30: Spatial distribution of height differences between 12.5 m GURS elevation model and lidar derived relief on automatically derived driving lane centreline points.

Primerjava višin sredinske linije voznega pasu na DMV 12,5 m in 0,5 m lidarskega reliefa, pokaže, da je DMV 12,5 m od lidarskega na pasu avtoceste v povprečju nižji za 0,60 m s standardnim odklonom 0,65 m. 75 % vrednosti reliefa GURS je nižjih od laserskih meritev. Največja negativna razlika je 2,66 m, največja pozitivna 0,95 m. Zaradi velike razlike v



prostorski ločljivosti reliefov so bile višine za lidarski relief določene z vplivnim območjem polmera 2 m (v povprečju 41 pikslov). Standardni odklon višine v vplivnem pasu je 3 cm. Prostorsko razmestitev razlik v višinah prikazuje slika 30.

Nadvoza nad avtocesto sem določil ročno, nadmorske višine cestišča pa pripisal iz modela površja.

## 4.5 Stavbe

V nadaljevanju je oblikovana metoda določitve višinskih parametrov stavb.

### uporabljeni podatki

- rastrski model višin zračnega laserskega skeniranja
- rastrski model površja, izračunan iz prvih in edinih odbojev netalnih točk
- kataster stavb

### izvedba

- določitev nadmorske višine baze
  - območje 1 m znotraj obodov stavb iz katastra
  - statistična določitev povprečne višine 1/8 najnižjih vrednosti modela višin
- določitev višine slemena
  - območje 1 m znotraj obodov stavb iz katastra
  - statistična določitev povprečne višine 1/32 najvišjih vrednosti modela površja
- določitev višine kapi
  - 1 m širok pas 1 m znotraj obodov stavb iz lidarskih podatkov
  - statistična določitev povprečne višine v kvartilnem razmiku iz modela površja

Stavbe so v fizičnem modelu računanja ravni zvoka obravnavane s svojimi zunanji ploskvami, ki jih opredeljujejo zunanji obod in višina. Van Maercke (2007, 46) za modeliranje srednje natančnosti predlaga najmanjšo velikost enote  $50 \text{ m}^2$ , s položajno in višinsko natančnostjo oboda 2,5 oziroma 1 m ter z največjim odstopanjem višine stavb 20 %. Z vidika cestninjenja časovna natančnost podatkov o stavbah ni zelo pomembna, zadostuje obnavljanje baze v petletnem, celo desetletnem obdobju (Chiari et. al 2007, 15).

Preglednica 8: Zahtevana natančnost modela stavb (Van Maercke 2007, 58; ).

Table 8: Accuracy requirements for buildings (Van Maercke 2007, 58).

	visoka natančnost	srednja natančnost
najmanjša velikost [ $\text{m}^2$ ]*	25	50
položajna natančnost [m]	1	2,5
višinska natančnost baze [m]	0,5	1
točnost višine [%]	10	20

\* najmanjša velikost je lahko manjša blizu virov zvoka

Na ravni celotne Slovenije so obrisi stavb vodeni v katastru stavb. Ocenjena položajna in višinska natančnost za dobro vidne stavbe je 0,5 m s 95 % gotovostjo. Kontrola podatkov je bila po obeh množičnih zajemih (fotogrametrija, začasni zajem) izvedena na naključno izbranim 5 % vzorcu, zato so še vedno lahko prisotne grobe napake (Kataster stavb – opis kakovosti izdelka 2004, 4). Iz katastra sem odstranil stavbe, ki nimajo realne grafične predstavitev (v katastru so prikazane z majhnim trikotnikom).

Za ugotavljanje informacij o stavbah iz lidarskih podatkov je bilo preizkušenih že mnogo različnih pristopov. V širšem kontekstu jih lahko razčlenimo v dve kategoriji:

- pristope, ki uporabljajo le podatke laserskega skeniranja, bodisi surove v obliki oblaka točk, ali izvedene v obliki rastrske celične mreže in
- pristope, ki uporabljajo podatke laserskega skeniranja in dodatne informacije (na primer obstoječe vektorske obrise zgradb).

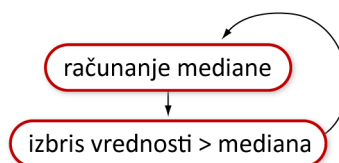
Obe skupini računata z vnaprejšnjo odstranitvijo (filtriranjem) neustreznih objektov iz oblaka laserskih točk (na primer rastja, avtomobilov). Obode stavb sem določil na dva načina, ročno in samodejno. Ročno sem spremenil kataster stavb, pri čemer sem za podlago uporabil normiran model površja. Za samodejni način sem izbral razmeroma preprosto, a zelo učinkovito metodo ločevanja na osnovi normiranega modela površja in standardnega odklona višin odbojev v posameznem pikslu (Švab Lenarčič 2009), ki sem jo deloma spremenil in dopolnil z večstopenjskim filtriranjem. Postopek je opisan v poglavju 4.7.1.

Eden ključnih parametrov pri modeliranju širjenja zvoka, ki ga je treba vedno oceniti, je *višina stavbe*. Primerjalne višine stavb sem določil iz atributnega dela katastra stavb z odštetjem višine karakteristične točke na površju, ki ponazarja položaj stavbe (H3), od višine najvišje točke stavbe (H2). Za vse objekte, katerih višine na ta način niso bile določljive (6,5 %) sem po priporočilih Chiari et al. (2007) upošteval višino objekta 8 m. Predhodna ocena horizontalne položajne točnosti je bila izračunana glede na uporabljene metode zajema in sicer: 0,12 m za fotogrametrični zajem, 0,5 m za zajem iz TTN 5 in 10, 1,5 m iz grafičnih podatkov zemljiškega katastra in več za terenski zajem brez navezave na mrežo. Višinska natančnost je ocenjena med 0,5 in 1 m in se ujema s standardi zajema DTK5 (Podobnikar et al. 2004, 107-108).

V študijah obremenjenosti s hrupom v Sloveniji se zaradi dostopnosti podatkov največkrat uporabljajo višine stavb, podane v katastru stavb. Vendar izsledki projekta Imagine (Van Maercke 2007, 59-60) kažejo, da je v primeru modeliranja srednje natančnosti, kjer nista upoštevani oblika in usmerjenost strehe, namesto višine slemena stavbe (največje višine) bolj primerno uporabiti višino kapi, saj se rezultati bolje prilegajo dejanskemu stanju upadanja ravni zvoka za stavbo. Študija je narejena na primeru metode Harmonoise, zato sem v disertaciji naredil še primerjavo razlik ravni zvoka ob upoštevanju višin slemen in kapi stavb pridobljenih iz lidarskih podatkov ter višin iz katastra stavb na primeru metode NMPB (poglavje 5.2).

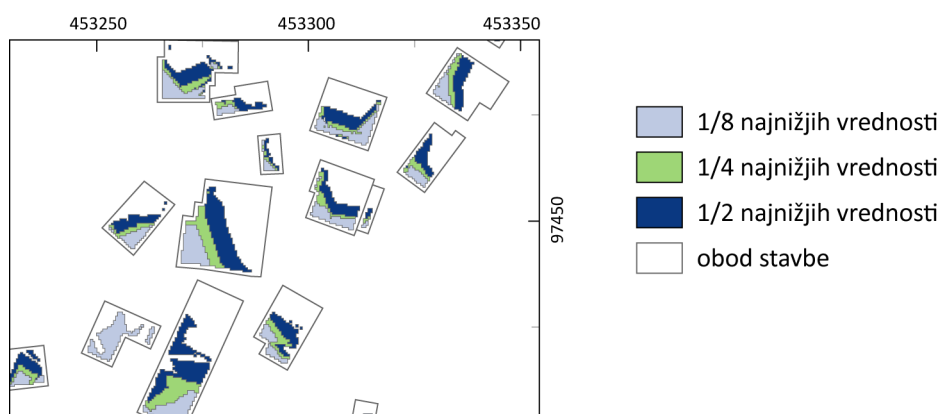
Iz lidarskih podatkov sem višine slemen določil z razliko med najmanjšo in največjo nadmorsko višino stavbe. Najmanjša višina stavbe je bila izračunana iz modela terena. Jaafar s soavtorjema (1999) navaja, da ima prostorska ločljivost modela površja pomembno vlogo pri določevanju višin stavb, zato sem vse operacije izvajal s podatki osnovne ločljivosti, ki niso bili dodatno filtrirani. Ročno popravljene katastrske obode stavb sem v izogib večjim napakam zaradi bližnje okolice (jarki, škarpe, stavbe na nasutjih in podobno) zmanjšal za en meter (bafer -1 m) in na teh območjih izračunal povprečje najnižjih 12,5 % vrednosti višin terena. Delež najmanjših vrednosti je arbitraren in pogojen z načinom izračuna. Možna sta dva načina ugotavljanja določenega odstotka najnižjih (najvišjih ali kje vmes) vrednosti, to je s statističnim programom ali v GIS okolju. Ker sem računanje želel ohraniti v slednjem, postopek pa v programski opremi ni opredeljen, sem se problema lotil z iterativnim brisanjem vrednosti na podlagi mediane. Mediana ali središčna vrednost je srednja vrednost, ki jo opredelimo kot vrednost, ki ustreza kvantilnemu rangi  $P = 0,5$  in je enaka drugemu kvartilu oziroma petemu decilu. To pomeni, da ima polovica enot preučevane populacije manjše ali enake, polovica enot pa večje ali enake vrednosti od te srednje vrednosti (Šadl 2001, 70). V prvi iteraciji, po izračunu mediane vrednosti višin pod posamezno stavbo in brisanju pikselov z vrednostmi večjimi od mediane, ostane polovica najnižjih vrednosti. S ponovitvijo postopka na preostalih celicah ostane četrtnina najnižjih vrednosti in tako dalje (slika 31, slika 32).

$M1 = \text{ZonalMedian}([R], [D])$   
 $R1 = \text{SetNull}([D] > [M1], [R])$   
 $M2 = \text{ZonalMedian}([R1], [D])$   
 $R2 = \text{SetNull}([D] > [M2], [R])$   
 $M3 = \text{ZonalMedian}([R2], [D])$   
 $R3 = \text{SetNull}([D] > [M3], [R])$   
 $\text{stavbe\_min} = \text{ZonalMean}([R3], [D]) / 100$



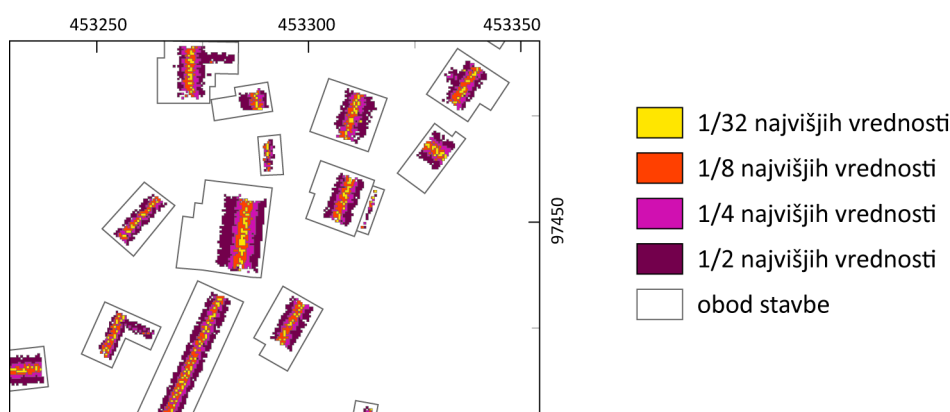
Slika 31: Primer algoritma za računanje določenega odstotka lokalnih vrednosti v okolju ArcGIS. [R] je raster oštevilčenih mask objektov, [D] je model višin s celimi števili (enota cm).

Figure 31: Example of algorithm for calculating a certain percentage of local values in ArcGIS. [R] is a numbered buildings raster; [D] is an elevation model in integer format (cm unit).



Slika 32: Ročno popravljene obode stavb iz katastra stavb. Barvni pasovi označujejo piksele z deležem najnižjih višin terena pod stavbo. Pas z višjim deležem vsebuje tudi pasove z nižjimi deleži.

Figure 32: Manually corrected building footprints from the building cadastre dataset. Colour bands represent pixels with lowest terrain altitudes. A band with a higher share includes bands with lower shares.

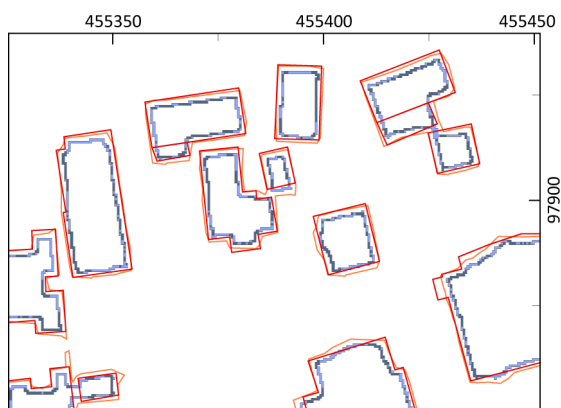


Slika 33: Ročno popravljene obode stavb iz katastra stavb. Barvni pasovi označujejo piksele z deležem najvišjih višin stavb. Pas z višjim deležem vsebuje tudi pasove z nižjimi deleži.

Figure 33: Manually corrected building footprints from the building cadastre dataset. Colour bands represent pixels with highest building heights. A band with a higher share includes bands with lower shares.

Višina vrha (slemena) stavbe je določena na podoben način, pri čemer je upoštevano povprečje 1/32 najvišjih vrednosti modela površja, izračunanega iz prvih in edinih odbojev netalnih točk (slika 33).<sup>15</sup> Višinske vrednosti sem ustreznim vektorskim ponazoritvam pripisal z dosledno uporabo enoličnih identifikatorjev.

Kapi stavb sem določil kot en piksel širok pas en meter znotraj obodov stavb, določenih iz lidarskih podatkov. Srednjo višino kapi sem izračunal iz kvartilnega razmika. Kvartilni razmik (QR) je statistični kazalnik, ki označuje razpon med tretjim in prvim kvartilom ( $QR = Q_3 - Q_1$ ) in je uporaben za odvzem vzorca 50 % vrednosti, ki so najbliže mediani. Je mera razpršenosti, na katero ekstremne vrednosti ne vplivajo (Košmelj et al. 64). Na ta način sem v veliki meri izločil višine teras in nižjih prizidkov, ki v katastru stavb niso posebej označeni, ter robove streh, ki povezujejo kapi s slemenom (slika 34). Samodejno določenim obodom stavb sem najmanjšo višino pripisal iz ročno popravljanih podatkov, kjer središčne točke prvih ležijo znotraj obodov drugih. Tistim, ki jih na ročno popravljene sloju ni, sem najmanjšo višino določil po zgoraj opisanem postopku.



Slika 34: Ročno popravljene obode stavb iz katastra stavb (rdeče), obode stavb, pridobljeni iz lidarskih podatkov (oranžno) in iz njih določene kape stavb (modro). Temno modra območja so bila uporabljena pri izračunu višine kapi.

Figure 34: Manually corrected building footprints from the building cadastre dataset (red), building footprints from lidar data (orange) and defined building gutters (blue). Pixels presented in dark blue were used for mean gutter height computation.

<sup>15</sup> Ker algoritem za mediano z realnimi števili ne zna računati, sem pred izračunom višinske podatke pretvoril v cela števila (množil s 100 in prištel 0,5).

Iz primerjave višin stavb in njihovih najnižjih točk (preglednica 9, slika 35) med katastrskimi in lidarskimi podatki, je razvidno, da sta tako povprečna razlika v višini baze, kot razlika v višini slemena zelo majhni, vendar je zlasti v povprečni višini slemena opaziti razmeroma veliko število enot z večjimi odstopanji. Pomembno je, da kar 18 % stavbam višine iz katastra ni bilo moč pripisati, bodisi ker ni opredeljena, bodisi ker stavbe niso zabeležene. Slednje je v veliki meri posledica časovne razlike med izdelavo katastra stavb in laserskim skeniranjem, kar kaže na neažurnost prvega. Povprečna višina strehe (razlika med višino kapi in višino slemena) je 2 m in je dokaj linearno povezana s površino stavbe (slika 36). Pri pregledu razlik, večjih od 5 m, se je izkazalo, da so vse posledica nerazčlenjenosti posameznih delov stavbe v katastru.

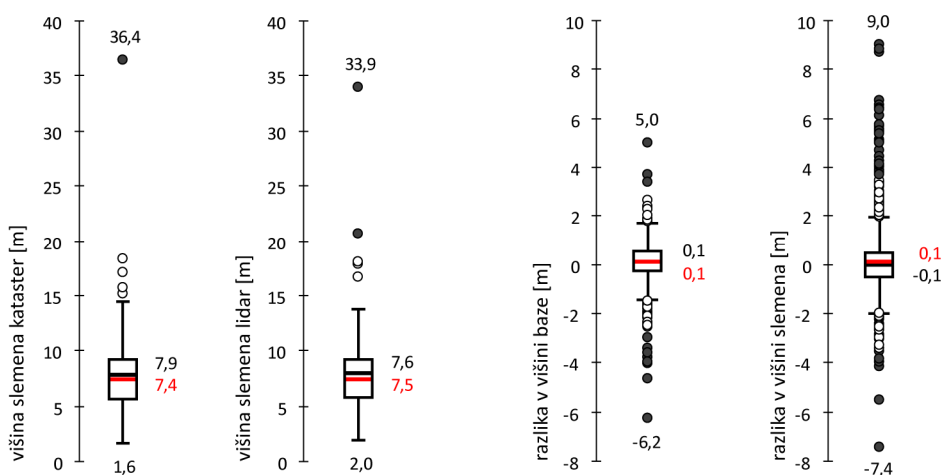
Preglednica 9: Primerjava višin stavb.

Table 9: Comparison of building heights.

	celotno proučevano območje *	ožje območje (O2) *
povprečna razlika v višini baze [m]	0,12	0,06
SO v razliki višine baze [m]	0,62	0,56
povprečna razlika v višini slemena ** [m]	0,08	0,24
SO v razliki višine slemena [m]	1,10	1,22
povprečna razlika med višino slemena in višino kapi [m]	-	2,06
SO razlike med kapjo in slemenom [m]	-	1,31

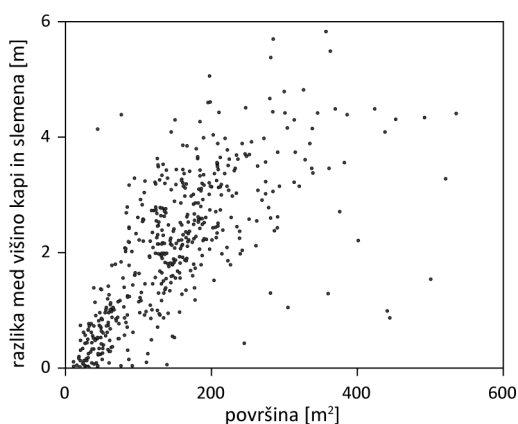
\* Statistika je izračunana le za stavbe, ki so zavedene tako v originalnem, kot popravljenem katastru in za katere sta v katastru zapisani tako najvišja višina, kot višina baze, t.j. za 2692 stavb (brez 596 oziroma 18 %) za širše in 425 (brez 82) za ožje območje. Študijsko območje je predstavljeno v poglavju 4.1.

\*\* V katastru stavb je zapisana najvišja točka stavbe.



Slika 35: Primerjalni intervalni grafikoni višin stavb. Odebeljena rdeča črta označuje povprečje, črna mediano.

Figure 35: Comparative box plots of building heights. Bold red line is mean and black average.



Slika 36: Grafikon odvisnosti razlike med višino kapi in višino slemena stavb od njihove površine. Razpon vrednosti je zaradi majhnega števila enot zmanjšan desno in zgoraj.

Figure 36: A diagram showing dependence of the difference between building gutter and ridge height, and building area. The range of values is reduced on top and right because of a small number of units.

V naslednjih odstavkih povzemam še izsledke novejših študij *samodejnega pridobivanja podatkov o zgradbah iz podatkov zračnega laserskega skeniranja*. Kljub temu, da jih nisem izvedel v praksi, jih navajam zaradi celovitosti in opredelitve možnosti pri nadaljnjem raziskovanju. Radarska interferometrija za izdelavo modela stavb, kljub visokoločljivim podatkom novejših satelitov in letalskega snemanja, še ni operativno uporabna (na primer Thiele et al. 2007; Xu in Ya-Qui 2007; Ferraiulo et al. 2009).

Kratek pregled trenutnega stanja in dosežkov na področju pridobivanja podatkov o stavbah je najti v Baltsavias (2004), Brenner (2001, 2005), Bretar (2008), Shan in Sampath (2008), Rottensteiner in Clode (2008), Sohn et al. (2008) ter Zhang et al. (2008). Analizo kakovosti podatkovnih slojev stavb, pridobljenih s polsamodejnimi fotogrametričnimi tehnikami (komercialni in operativni sistemi), polsamodejnimi in samodejnimi tehnikami obdelave podatkov ZLS (komercialni in raziskovalni sistemi) ter polsamodejnimi in samodejnimi tehnikami obdelave združenih podatkov (raziskovalni sistemi), podrobneje obravnavajo Gülch et al. (2008). Ugotovili so, da sta položajna in višinska natančnost ugotovljenih stavb zelo odvisni od gostote snemanja in ravni samodejnosti postopka. Prva v povprečju znaša med 0,8 m pri dveh in 0,5 m pri 15 točkah na m<sup>2</sup>, druga pa med 0,5 m in boljše kot 0,2 m pri dveh oziroma 15 točkah na m<sup>2</sup>. Pri nizki ravni samodejnosti znaša položajna natančnost med 0,2 in 0,3 m, pri visoki pa med 0,6 in 1 m. Na višinsko natančnost raven samodejnosti ne vpliva. Za rezultate je pomembno, da so bili za vsa testna območja uporabljeni le podatki prvih odbojev. V primeru zagotovljenih informacijah tudi o zadnjem, bi bili rezultati še

bistveno kakovostnejši. Avtorji ugotavljajo, da je kljub intenzivnemu razvoju in raziskavam v zadnjem desetletju raven samodejnosti še vedno razmeroma nizka ter, da bo večji preboj dosežen s tehnikami, ki združujejo prednosti tako fotogrametrije kot ZLS.

Metode prepoznavanja stavb lahko z vidika predpostavk o stavbah razdelimo na takšne, ki jih vodijo modeli (angl. model-driven, top down) in takšne, ki jih vodijo podatki (angl. data-driven, bottom up), z vidika prevladujočega procesa pa na geometrične in statistične. Delitev je groba, saj veliko metod uporablja kombinacijo pristopov na primer s postavljanjem hipotez in njihovim preizkušanjem. Ključnega pomena je tudi, kako je organizirano iskanje, zlasti kako je ogromni iskalni prostor skrčen s tehnikami, kot sta (diskretno) popuščanje in odločitveno drevo (Brenner 2005, 189). Primerjava pokaže, da so modelni pristopi hitrejši z vizualno privlačnejšim rezultatom, medtem ko podatkovni pristopi lahko bolj verno predstavijo detajle pri ustrezni ločljivosti podatkov (Tarsha-Kurdi et. al 2007). Slednji prevladujejo in so primernejši, kjer je stavbe težko opisati s parametri ali pri podatkih z veliko šuma. O stavbah predpostavljajo le splošne značilnosti na primer ploščate strešne ploskve, zato je glavni izziv iskanje sestavnih ploskev ali drugih osnovnih delov, kot so linije in oglišča (Shan in Sampath 2008, 423).

Preglednica 10: Smiselnost uporabe daljinskega zaznavanja za izdelavo modela stavb.

Table 10: Applicability of remote sensing techniques and technologies to produce a model of buildings.

		časovna natančnost	položajna natančnost	višinska natančnost	zmožnosti posodabljanja	strošek
letalska fotografija						
	vizualna fotointerpretacija					
	samodejna obdelava					
visokoločljivi sateliti						
	vizualna fotointerpretacija					
	samodejna obdelava					
zračno lasersko skeniranje						
	vizualna interpretacija					
	samodejna obdelava					
ustreznost	velika					



## 4.6 Protihrupne pregrade in zadrževalni zidovi

V tem razdelku so opisane metode pridobitve podatkov o legi in višini protihrupnih pregrad.

### uporabljeni podatki

- oblak točk zračnega laserskega skeniranja
- rastrski sloj povprečne intenzitete
- rastrski model višin zračnega laserskega skeniranja in iz njega izračunani:
  - navpična ukrivljenost
  - delež vidnega neba
  - krajevni standardni odklon višin

### izvedba

- vizualna interpretacija
- trirazsežni pregled oblaka točk
- profiliranje

V fizičnem modelu širjenja zvoka so zidovi in pregrade prikazani kot: orientirane navpične ploskve, ki prispevajo odbite poti širjenja zvoka; podnožja (baze), ki so prikazana kot krivulje na terenu; vršni robovi (sestavljene iz lomnih linij in/ali nezveznosti) in navpični robovi. V nasprotju z zidovi, ki so praviloma trde odbojne strukture, morajo imeti protihrupne pregrade določen koeficient absorpcije, saj so običajno zasnovane tako, da ščitijo območja, ki ležijo za njimi, vendar hkrati ne poslabšajo situacije na območjih na drugi strani prometne infrastrukture. Najpomembnejši podatek je linija vršnega robu, saj ta najbolj vpliva na učinkovitost pregrade.

Preprostejše metode, tudi NMPB, ugotavljajo vpliv ovir z neposrednimi vidnostmi. Če na poti med virom in sprejemnikom algoritem zazna oviro, jo izračun jakosti zvoka upošteva tako, da ovira vpliva na zmanjšanje jakosti zvoka. To velja tudi, če je njena višina 0 m (Braunstein in Berndt 2008, 163). Naprednejše metode uporabljajo Fresnelove kolobarje oziroma cone. Fresnelova cona je funkcija valovne dolžine ( $\lambda$ ) valovanja ter razdalj od točke na ravni črti med virom in sprejemnikom do vira in sprejemnika (Nota et al. 2005, 33-34; glej tudi prilogo C). To je pomembno pri odločitvi za vključitev posamezne ovire v model, saj ne obstaja absoluten kriterij glede na dolžino ovire. Izločitev 50 m dolge ovire lahko uvede napake velikosti do +10 dB v območju za oviro, vendar je to območje majhno in napake so z vidika kartiranja večjih regij zanemarljivi.

Položajna in višinska natančnost ovire sta pomembni zlasti v relativnem razmerju glede na najbližji vir zvoka, zato je treba v modelu lokacijo vršnega roba pregrade umestiti z veliko natančnostjo glede na vozišče, četudi to privede do večjih absolutnih položajnih napak glede na okoliški relief. Pri modelih visoke natančnosti je treba modelirati vse navpične konstrukcije višje od približno 1 m (vključujoč vrtno zidove, plotove, betonske pregrade

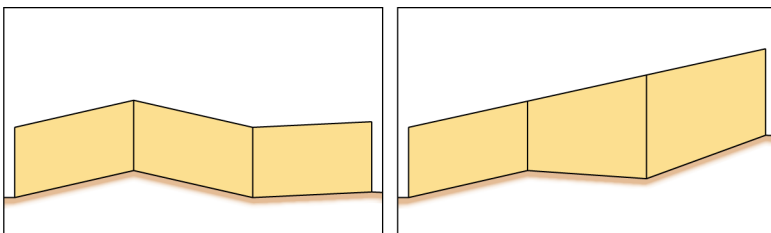
proti trkom in podobno), saj lahko pripomorejo nižjim emisijam zvoka. Van Maercke (2007, 64) za modeliranje srednje (visoke) natančnosti predlaga najmanjšo višino ovire 1 m (0,5 m), dolžino 20 m (5 m) in položajno natančnost 2,5 m (1 m) (preglednica 11).

Preglednica 11: Zahtevana natančnost modela stavb (Van Maercke 2007, 64).

Table 11: Accuracy requirements for buildings (Van Maercke 2007, 64).

	visoka natančnost	srednja natančnost
najmanjša višina [m]	0,5	1
najmanjša dolžina [m]	5	20
položajna natančnost [m]	1	2,5
višinska natančnost [m]	0,5	1

Rekonstrukcija pregrad je odvisna od njihove postavitve na teren, saj zgornji rob lahko sledi liniji terena ali pa sledi liniji cestišča, torej ščiti pred hrupom neodvisno od krajevne konfiguracije reliefa (slika 37), kar je zlasti pomembno pri ovirah, postavljenih na nasipe ob prometni infrastrukturi. Glede na to je treba prilagoditi način prostorskega zapisa pregrad – najprimernejša je trirazsežna vektorska linija zgornjega roba, baza pa se samodejno projicira na teren, lahko tudi z upoštevanjem nagiba ovire. Ugotavljanje nagiba je pomembno pri naprednejših algoritmičnih modeliranju širjenja zvoka, saj ga upoštevajo pri izračunu poti odbitega zvoka.



Slika 37: Rekonstrukcija oblike pregrade iz podatkov o bazi in višini s predpostavljeno linearno interpolacijo višine (levo) ali višino do zgornjega roba (desno).

Figure 37: Reconstruction of the barrier shape from its base line and height information, assuming linear interpolation of height (left) or altitude at the top edge (right).

Pri samodejni izgradnji fizičnega modela iz uvoženih podatkov, je treba biti pozoren na težave, ki nastanejo zaradi odvisnosti računskih metod od njegovih geometričnih značilnosti. Nekateri fizikalni izrazi vgrajeni v modele širjenja zvoka namreč temeljijo na »čistosti« posameznih objektov; na primer odsotnosti ostalih ovir vsaj v manjšem območju okrog ovire, kar ima za posledico nepravilne izračune ravni zvoka pri dolgih protihrupnih

pregradah z majhnimi odprtini (glede na valovno dolžino zvoka<sup>16</sup>) in pri prečnem lomu okrog zelo kratkih ovir (krajših od nekaj valovnih dolžin). Zato je treba (samodejno ali ročno) zapolniti manjše odprtine in odstraniti kratke odbojne in lomne ovire iz modela (Van Maercke 2007, 30-31). Našteto je treba upoštevati pri morebitnem samodejnem odkrivanju pregrad.

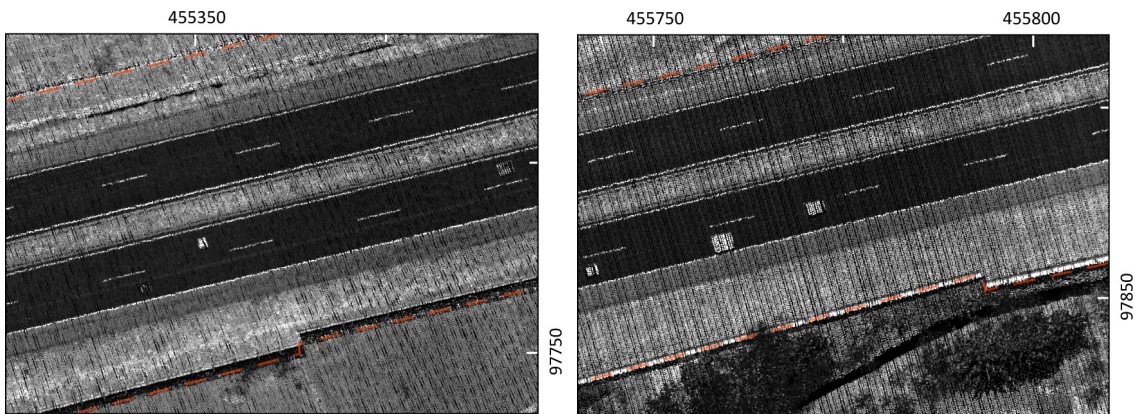
Čeprav so protihrupne pregrade (ovire) poleg same umestitve cest v prostor najpomembnejši ukrep zaščite pred povišanimi ravni zvoka, v Sloveniji njihove uradne elektronske prostorske evidence ni niti za prostor ob cestah najvišjega ranga.

Z vidika višine pregrade niso problematične in jih je na odprtem terenu lahko identificirati iz slike največjih višin odbojev laserskega skeniranja. Težava se pojavi, ko so bodisi pod rastlinjem bodisi morfološko nadaljujejo nasip ali pa se stikajo z drugimi objekti. Pri nizki gostoti snemanja jih je zlahka zamenjati z ograjami, ki ne zmanjšujejo ravni zvoka in katerih tipičen predstavnik so žičnate ograje za preprečevanje dostopa do cestišča. Samodejna detekcija je še dodatno otežena, saj so pregrade običajno ozke in visoke, kar je pri filtriranju tipičen izločitveni primer.

Intenziteta je za samodejno določevanje poteka pregrad manj uporabna, saj je njena vrednost preveč spremenljiva zaradi različne izvedbe protihrupnih pregrad in/ali drugih dejavnikov, hkrati pa se ne loči vedno dovolj od vrednosti okoliškega terena (slika 38). Severni pregradi na tej sliki sta z vidika intenzitete popolnoma nerazvidni. Problema ni rešilo niti normiranje intenzitete posameznih preletnih linij (glej stran 91).

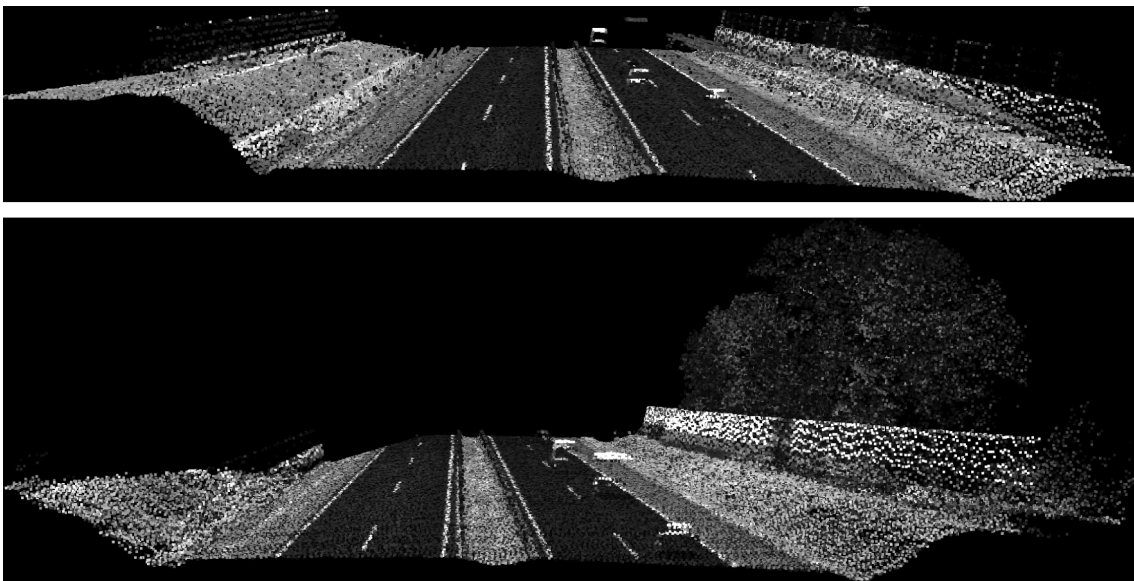
---

<sup>16</sup> Valovna dolžina zvoka je odvisna od hitrosti širjenja zvoka v zraku in njegove frekvence  $\lambda = c / \nu$ . Hitrost zvoka v zraku s temperaturo 20°C (293,15 K) je 343,2 ms<sup>-1</sup>.



Slika 38: Slike intenzitete z nakazanima protihrupnima pregradama (črtkano blede rdeče). Južna pregrada na sliki desno odstopa od slike intenzitete, ker je pregrada nagnjena in vrh slabše odbija infrardeči laserski žarek od spodnjega dela, kar je ravno obratno, kot na sliki levo. Slika 39 prikazuje trirazsežni pogled obeh območij

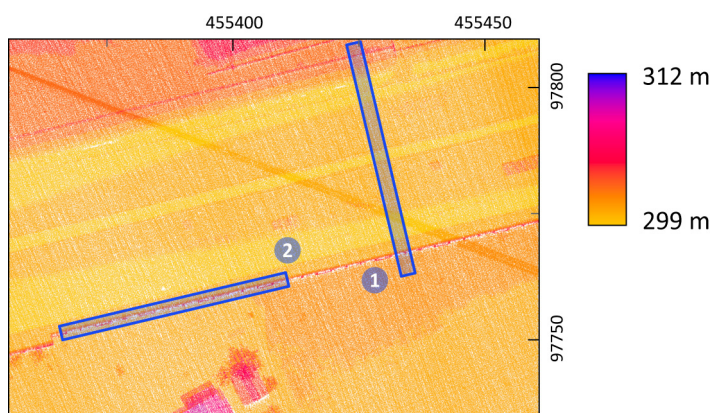
Figure 38: Intensity images with noise barriers (dashed pale red line). Intensity is not useful in automatic detection of noise barriers due to its variability that is an effect of different construction materials and/or other factors. Southern barrier on the right plate deviates from the intensity because of its inclination and the upper part being less reflective than the lower – the contrary to the southern barrier on the left plate. Northern barriers are not distinguishable from the terrain in intensity. Figure 39 presents 3D view of the areas.



Slika 39: Trirazsežni prikaz oblakov točk v smeri avtoceste od zahoda proti vzhodu. Svetlost prikazuje intenziteto. Zaradi odboja z višjih plasti je njena vrednost pod rastjem zmanjšana, kot je razvidno s sredine desne ograde na spodnjem območju. Prikazani sta isti območji kot na prejšnji sliki.

Figure 39: 3D point cloud oriented from west to east in the direction of the highway. Grey values represent intensity. Intensity is reduced under the vegetation due to reflectance from upper layers as seen in the middle of the right barrier on the lower image. Areas represented are the same as in the previous image.

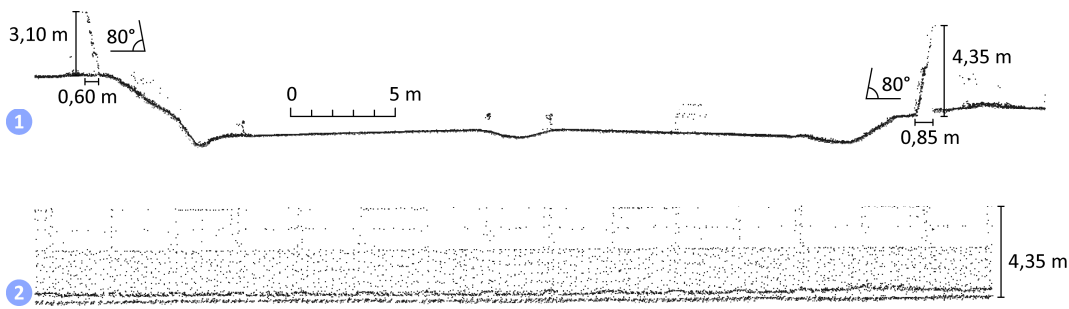
Lege ter nagib in višine pregrad sem določil ročno; prve na podlagi rastrskih slik ukrivljenosti reliefa, deleža vidnega neba in krajevnega standardnega odklona višin reliefa, druge pa s profiliranjem in trirazsežnim pregledom oblaka laserskih točk. Krajevni standardni odklon je standardni odklon, izračunan za vsak piksel po tem, ko je bil odstranjen trend reliefa. Za lokacije pregrad sem privzel njihov vršni rob. Zaradi morebitnih razlik v višini terena pred in za pregrado (slika 41 spodaj) (na primer pregrade so večkrat zgrajene na samem robu cestišča in se nagibajo čez obcestni jarek) sem pred samodejnim pripisom nadmorske višine bazam izračunal njihovo lego iz podatkov o nagibu in višini (slika 41 in slika 42). Večinoma je šlo torej za premik v smeri cestišča, na primer za 0,7 m pri pregradi visoki 4 m in nagnjeni za  $10^\circ$  od navpičnice. Zaradi »zajed«, ki jih naredi algoritem filtriranja točk pri veliki višinski razliki, sem moral višine baz ročno popraviti na posameznih mestih z veliko višinsko razliko neposredno ob cestišču (na primer ob prepustu za potok Radna pod avtocesto). Veliko lažja pot je neposredna označitev protihrupnih pregrad neposredno v oblaku laserskih točk v namenskem programu (na primer Terrascan), vendar mi je bila tovrstna oprema dosegljiva šele ob koncu pisanja naloge.



Slika 40: Lokacija profilov naslednje slike. Barve označujejo nadmorske višine.

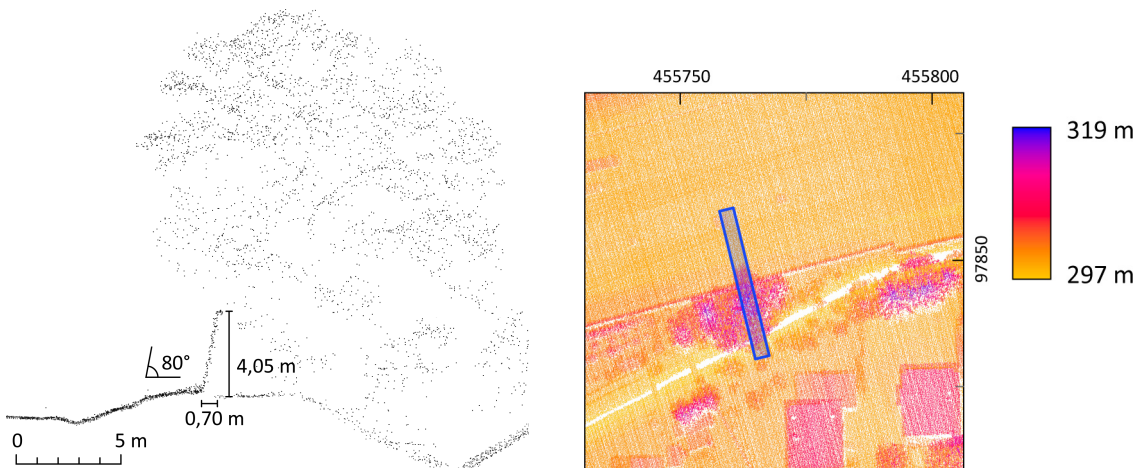
Figure 40: Location of profiles from the next figure. Colour scale represents elevation.





Slika 41: Profil dolžine 48,5 m prečno na avtocesto (zgoraj) in profil dolžine 45 m vzdolž protihrupne pregrade (spodaj). Oba prikazujeta oblak točk v pasu širine 3 m. Metrični parametri pregrad so iz profilov ročno dobro določljivi. Na profilu vzdolž pregrade je opaziti tudi njeno dvojno zgradbo, spodaj polno, zgoraj v kombinaciji s prozornimi ploščami. Dvojna »črta« pod pregrado je posledica različne višine terena pred in za njo. Gostota snemanja je 52,9 točke na  $m^2$  (kombinacija šestih snemalnih pasov s po 3,2, 3,5, 3,9, 5,5, 17,6 in 19,2 točke/ $m^2$ ).

Figure 41: 48.5 m long profile perpendicular to the highway (1) and 45 m long profile along the noise barrier (2). Both are 3 m wide. Manual characterization of metrical parameters of noise barriers is comparatively straightforward. Double structure of noise barrier is clearly revealed on the lower profile, the lower part is opaque, and the upper part is made primarily of transparent material. Data density is 52.9 pts/ $m^2$ .



Slika 42: Profil širine 3 m in dolžine 25 m prečno na avtocesto. Z dovolj veliko gostoto snemanja je protihrupna pregrada dobro razločna tudi pod rastjem. Gostota snemanja je 44,3 točke na  $m^2$  (kombinacija petih snemalnih pasov s po 4,8, 5,5, 5,7, 6,3 in 23,0 točke/ $m^2$ ).

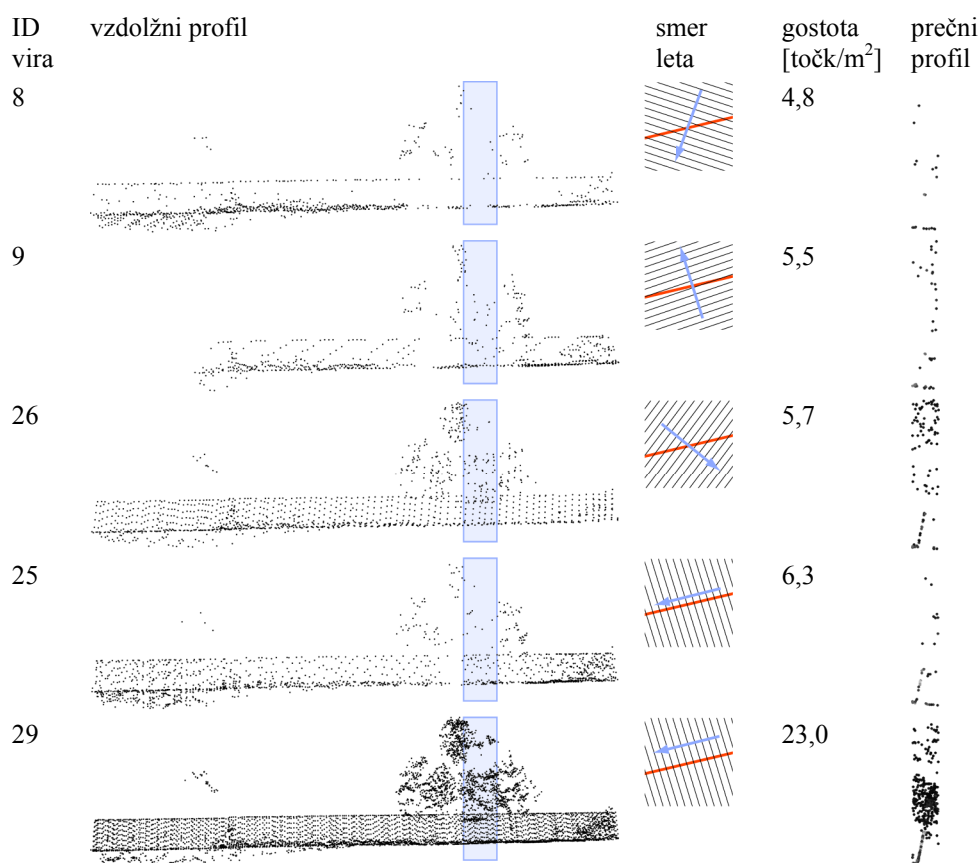
Figure 42: 25 m long and 3 m wide profile perpendicular to the highway. High scanning density ensures good recognition of noise barriers under vegetation. Data density is 44.3 pts/ $m^2$ .

Morebitne (pol)samodejne rešitve vključujejo klasifikacijo (razrez) reliefa ob avtocesti po višinskih razredih, glede na krajevno razgibanost (normalizacija reliefa – odstranitev trenda) in iskanje vodilnih linij (na primer s Houghovo transformacijo, ki je uporabna pri iskanju vseh krivulj, ki se dajo zapisati kot parametrična funkcija).

S spodnje preglednice je razvidno, da je za identifikacijo pregrade in določevanje njenih geometrijskih lastnosti poleg dovolj visoke gostote snemanja pomembna tudi smer snemanja glede na lego pregrade. Ob (približno) enaki gostoti je pregrada glede na smer leta platforme (helikopterja) in kota leta glede na pregrado čisto drugače razvidna, saj je vzorec odboja povsem različen, kar bi morali upoštevati tudi prihodnji algoritmi samodejnega zaznavanja.

Preglednica 12: Vzdolžni in prečni profil protihrupne pregrade glede na smer in vpadni kot laserskega žarka ter gostoto snemanja. Modra puščica nakazuje smer leta helikopterja, črne črte projekcije laserskega žarka, oranžna črta usmerjenost ovire, modri poligon pa lokacijo prečnega profila. Zaradi mehanizma snemanja (vrteče večkotno zrcalo) so projekcije žarka vzporedne. Oba profila sta širine 3 m.

Table 12: Profiles perpendicular to (right) and along (left) the noise barrier in relation to the scanning direction, angle and density. Blue arrow indicates helicopter flight direction, black lines laser projection on ground, orange line barrier orientation, and blue polygon shows the location of the transverse profile. Laser projections are parallel due to scanning mechanism (rotating polygon mirror). Both profiles are 3 m wide.



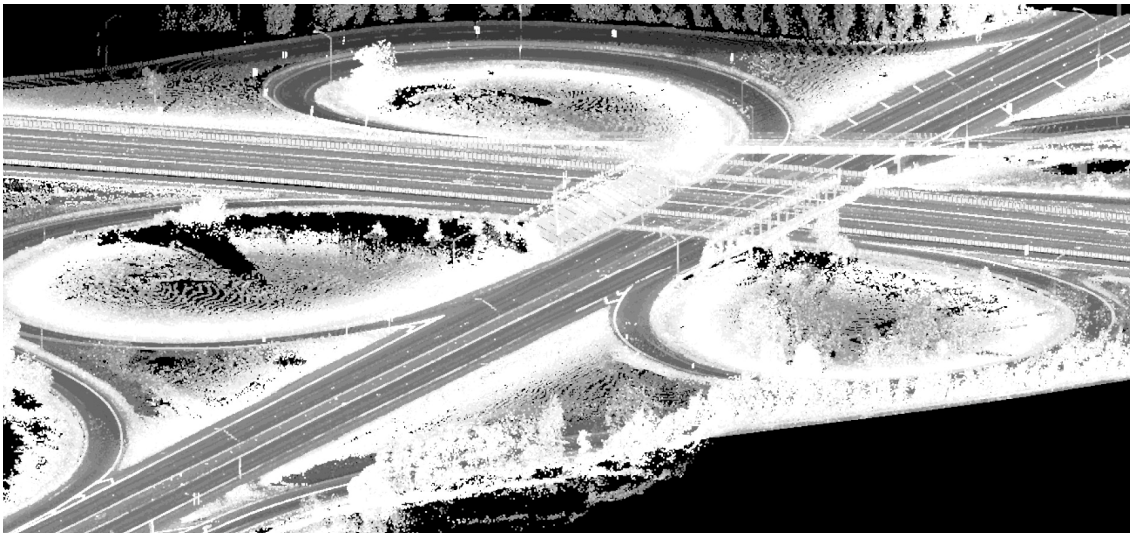
Ker imajo protihrupne pregrade velik neposreden vpliv na zmanjšanje ravni zvoka v okolici in s tem na manjši vpliv cestnega prometa na okoliško prebivalstvo je treba podatkovno bazo posodablјati v krajšem časovnem obdobju, kot na primer za zgradbe. Primerno bi bilo letno ali dveletno obdobje. Zelo smiselno bi bilo bazo voditi centralno vsaj za državne ceste, vanjo

pa se pregrade dodajale ob njihovi postavitvi. Načrti zanje so namreč digitalni, res pa je, da neredko pride do sprememb med predlaganimi, projektiranimi in dejansko izvedenimi.

Preglednica 13: Smiselnost uporabe daljinskega zaznavanja za izdelavo modela protihrupnih pregrad.

Table 13: Applicability of remote sensing techniques and technologies to extract noise barriers.

		časovna natančnost	položajna natančnost	višinska natančnost	zmožnosti posodabljanja	strošek
letalska fotografija						
	vizualna fotointerpretacija	■	■	■	■	■
zračno lasersko skeniranje						
	ročna interpretacija	■	■	■	■	■
lasersko skeniranje z vozila						
	ročna interpretacija	■	■	■	■	■
ustreznost	velika ■	srednja ■	majhna ■			



Slika 43: Trirazsežni oblak točk stičišča avtocest posnetega z laserskim sistemom nameščenim na avtomobil. Svetlost prikazuje intenziteto (Ambercore 2008).

Figure 43: A point cloud of a highway junction scanned with a car-mounted lidar system (Ambercore 2008).

V zadnjih nekaj letih so bili razviti laserski sistemi, ki jih lahko namestimo na cestna in železniška vozila (terenska vozila, poltovornjake, kombije), za katere se je v angleščini ustalilo ime »mobile lidar systems«. Natančnost, ki jo dosegajo tovrstni sistemi v dobrih pogojih snemanja znaša med 3 in 5 cm v navpični ter med 3 in 10 cm v vodoravni smeri. Obe sta zelo odvisni od razdalje med objektom in skenerjem. Tehnične značilnosti, pri katerih so laserski skenerji na vozilih uporabni, se izboljšujejo z vsakim novo razvitim



sistemom, najnovejši dosegajo hitrosti oddajanja pulza 200 kHz, gostoto do 10.000 točk/m<sup>2</sup>, dajo uporabne rezultate pri hitrostih vozila do 100 km/h, na razdalji do 200 m od senzorja. Zelo primerni so za opazovanje avtocest in njim bližnjih objektov, z vidika izdelave kart ravni zvoka zlasti za določevanje lastnosti protihrupnih pregrad in izdelavo trirazsežnih modelov mest (slika 43). V kombinaciji s foto ali video kamerami lahko določimo tip pregrade, kot tudi druge objekte in njihove lastnosti, pomembne pri upravljanju s prometno infrastrukturo in prometom (na primer talne označbe, prometne znake, stanje rastja ob cestah, višine predorov, nadvoзов in žic, ki so napeljane čez cestišče, ter samo zgradbo cestnega telesa) (Kramer in Hunter 2007; Haala et al. 2008; Glennie 2009).

## 4.7 Akustična (zvočna) impedanca tal

Ugotavljanje upornosti tal na zvočno valovanje je pri preprostih izračunih ravni zvoka omejeno na ločevanje med »mehkimi« in »trdimi« območji, ki jih lahko operater za manjša območja določi ročno. Novejše metode zahtevajo bolj natančne opredelitve, tako vsebinsko, kot prostorsko, zato lahko ročno zrišemo le zelo majhna območja različnih impedančnih razredov, ki so bila predhodno določena z meritvami, medtem ko pri večjih proučevanih površinah to ni mogoče. Tako se pojavlja potreba po novem kartografskem izdelku, ki prikazuje razrede zvočne impedance tal.

Akustična impedanca  $Z$  (ali zvočna impedanca) je od frekvence  $f$  odvisen parameter. Matematično je to razmerje med pritiskom zvoka  $p$  ter hitrostjo delca  $v$  in ploščino  $S$  skozi katero potuje zvočni val s frekvenco  $f$ . Če impedanco izračunamo za niz frekvenc je rezultat impedančna krivulja (Telford et al. 1990). Specifična akustična impedanca  $Z_0$  [N·s·m<sup>-3</sup>] je lastnost materiala, odvisna od gostote medija  $\rho$  in hitrosti zvočnega valovanja v njem  $c$ :

$$Z_c = \rho \cdot c. \quad (7)$$

Za eksperimentalno merjenje akustične impedance obstaja več skupin metod, vendar so za njeno določevanje večjih površin v naravi praktično uporabne le metode, ki ne upoštevajo odbojev pod neresonančnimi ali kotneresonančnimi pogoji (angl. free field methods under anechoic and semi-anechoic conditions), medtem ko druge zahtevajo laboratorijske pogoje. Večina praktičnih aplikacij ne uporablja merjenih vrednosti temveč se opira na modeliranje

impedance. Modeli so osnovani na empirično določenem razmerju med eno ali nekaj fizičnimi lastnostmi materiala in njegovo specifično akustično impedanco. Delany in Bazley (1970) sta zasnovala model, ki akustično impedanco materiala pri določeni frekvenci ( $f$  srednja frekvenca 1/3 oktavnega razreda v Hz) oceni z enim parametrom, t.j. kot funkcijo njegovega upora za zvočni tok  $\sigma$  [ $\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-4}$ ], ki ga lahko neposredno merimo:

$$Z_c = 1 + 9,08 \left( \frac{10^3 f}{\sigma} \right)^{-0,75} + 11,9 \cdot j \left( \frac{10^3 f}{\sigma} \right)^{-0,73}. \quad (8)$$

Model je umerjen za neskončne homogene porozne materiale, vendar deluje razmeroma dobro tudi pri večini praktičnih aplikacij, zato se največkrat uporablja v modeliranju širjenja zvoka za potrebe ocen hrupa. Za zelo natančne, referenčne študije pa je priporočena uporaba popravljenih enačbe, ki jo je dopolnil Miki (1990), saj bolje opiše impedanco pri nižjih frekvencah.

Zvočna impedanca tal je odvisna od dejavnikov, ki jih je z daljinskim zaznavanjem razmeroma lahko določiti, na primer pokrovnosti, gostote rastja in fizikalnih lastnosti površja, vendar tudi od drugih, ki jih iz spektralnih lastnosti tal ni moč razločiti, na primer poroznosti ali zbitosti tal, imajo pa nanjo pomemben vpliv. Zato neposredne zveze med spektralno odbojnostjo tal in njihovo impedanco ne gre pričakovati, vendar lahko domnevamo na zvezo med akustičnimi lastnostmi tal in kategorijami pokrovnosti. Študija, ki so jo opravili Sohlman et al. (2004), definirajo povezanost med impedančnimi razredi in uveljavljenimi standardnimi razredi pokrovnosti oziroma rabe tal<sup>17</sup>. Izdelavo prostorskih

---

<sup>17</sup> Treba je zapisati nekaj osnovnih razlik med rabo tal (angl. land use) in pokrovnostjo (angl. land cover). Raba tal lahko opredelimo kot namen za katerega ljudje izkoriščajo nek kos zemljišča, s poudarkom na namenski vlogi zemljišča v gospodarskih aktivnostih. Raba tal je abstraktna in je včasih ne moremo določiti niti s podrobnim ogledom. Pokrovnost, na drugi strani, je konkretna in jo lahko kot tako neposredno opazujemo (Campbell 1996, 550). Na primer, kos zemljišča na robu urbanega območja je lahko pozidan z enodružinskimi hišami. Glede na raven detajlov, lahko njegovo rabo tal določimo kot urbano ali natančneje stanovanjsko. Ta isti kos zemljišča pa ima pokrovnost iz streh, asfalta, trave in dreves. Za planiranje socio-ekonomske rabe tal (potrebe po šolah, dohodek od davkov in podobno) bi bilo pomembno vedeti, da je to zemljišče pozidano z enodružinskimi hišami. Za hidrološko analizo lastnosti odtočnega količnika, bi bila pomembna delež in razporeditev streh, asfalta, trave in dreves na tem ozemlju. Zatorej moramo biti za uspešno načrtovanje in gospodarjenje z zemljišči seznanjeni tako z njihovo rabo tal kot pokrovnostjo (Lillesand in Kieffer 1994, 170). Razlika postane pomembnejša, ko merilo raziskave postane večje in detajli podrobnejši (Campbell 1996, 550).

podatkov o impedanci tal iz podatkov daljinskega zaznavanja lahko v grobem označimo kot dvostopenjski proces (slika 44). Prvi je klasifikacija pokrovnosti, drugi transformacija v karto zvočne impedance. Omenjena študija se posveča slednjemu. Temelji na vzorčnih terenskih meritvah akustične impedance izbranih kategorij pokrovnosti, določenih v klasifikacijskem ključu Corine (Evropska komisija 1994, 22-25). Med glavnimi ugotovitvami je trditev, da je pri preklasifikaciji treba upoštevati dodatne dejavnike in operaterjevo znanje, saj meritve izkazujejo veliko spremenljivost znotraj posameznih razredov pokrovnosti oziroma rabe tal, kar ni presenetljivo, saj že sama nomenklatura Corine vsebuje mešane razrede (na primer zelene mestne površine so lahko vse od gozda do parka). Avtorji kljub temu menijo, da je bolje imeti vsaj približno osnovano prostorsko informacijo o impedanci proučevanega območja, kot biti brez nje. Sam sem misel nadgradil in menim, da je treba bolje zasnovati že prvi del procesa, samo klasifikacijo. Pri tem je smiselno upoštevati dejavnike, ki lahko nakazujejo stopnjo zbitosti tal, na primer, rekreacijski gozd v bližini jezera ali v mestu je zaradi pogostega obiska v višjem impedančnem razredu kot naravni gozd, enako velja za intenzivni pašnik proti travniku. S tem že posegamo na zelo težavno področje razmejevanja med pokrovnostjo in rabo tal. Tudi zato sem v nadaljevanju opravil študijo, kakšen naj bo proces izdelave impedančne karte iz nekaterih obstoječih slovenskih prostorskih baz pokrovnosti oziroma rabe tal.



Slika 44: Poenostavljen prikaz procesa izdelave impedančne karte iz podatkov daljinskega zaznavanja.

Figure 44: Simplified presentation of impedance map production process from satellite imagery.

Občutljivost širjenja zvoka na zvočno impedanco je zaradi interference med neposrednim in odbitim zvočnim valovanjem največja pri srednje veliki oddaljenosti od vira, torej približno med 200 in 500 m (Van Maercke 2007, 46). Zaradi možne velike odvisnosti kratkoročnih ravni zvoka na izbrani impedančni razred so za tovrstne študije priporočljive terenske meritve, na drugi strani pa se pri dolgoročnih ravneh vpliv motenj v veliki meri izpovpreči zaradi spremenljivih vremenskih pogojev (Chiari et al. 2007, 37-38).

Preglednica 14: Zahtevana natančnost impedančne karte (Van Maercke 2007, 46).

Table 14: Impedance map accuracy requirements (Van Maercke 2007, 46).

	visoka natančnost	srednja natančnost
najmanjša površina zajema [m <sup>2</sup> ]	10	100
najmanjša krajša razsežnost zajetega območja ali objekta [m]	1	2,5
napaka klasifikacije [razred]	0	±1

Najmanjša velikost ploskovne enote, ki ima še pomemben vpliv na širjenje zvoka, je odvisna od razdalje širjenja, razlike lastnosti enote in okoliškega terena ter lokacije vira in sprejemnika v odvisnosti od reliefa. Van Maercke (2007, 46) za modeliranje srednje natančnosti predlaga najmanjšo površino zajema 100 m<sup>2</sup>, z najmanjšo dimenzijo ne krajšo od 2,5 m ter klasifikacijsko natančnostjo v razrede impedance s standardno napako manjšo od enega razreda. V spodnjih preglednicah so opredeljeni impedančni razredi ter opisi tipičnih vrednosti in kategorij pokrovnosti oziroma rabe tal. Sohlman et al. (2004, 41) priporočajo potrditev veljavnosti svoje klasifikacije v regijah z geografskimi razmerami, ki se bistveno razlikujejo od pogojev v katerih so bile opravljene meritve (južna Švedska), pri čemer posebej izpostavljajo območja z bistveno drugačnim rastjem (Sredozemlje).

Preglednica 15: Razredi akustične impedance tal (Kragh et al. 2006, 23; Sohlman et al. 2004, 38; Chiari et al. 2007, 37-38).

Table 15: Classified ground impedance classes (Kragh et al. 2006, 23; Sohlman et al. 2004, 38; Chiari et al. 2007, 37-38).

impedančni razred	opis	tipični upor* $\sigma$ [kNsm <sup>-4</sup> ]	impedančni koeficient G
A	zelo mehko (sneg, mah)	12,5	1,00
B	mehka gozdna tla (nizka gosta podrast, kot resje ali debel mah)	31,5	1,00
C	ne zbita, rahla tla (barje, trava, rahla prst)	80	1,00
D	običajna ne zbita tla (gozdna tla, pašnik)	200	1,00
E	zbita tla in prod ali pesek	500	0,75
F	gosto zbita tla (makadamska cesta ali parkirišče)	2000	0,33
G	trdna površina (čvrst asfalt, beton, voda)	20.000	0,10

\* upor v materialu pri mirujočem zraku (angl. static air flow resistivity of material)

Ceste, letališke steze in druge asfaltirane površine, ki niso omenjene v zgornji tabeli, je treba klasificirati posebej in jim pripisati ustrezno impedanco, enako velja za železniške proge, katerih impedanca je lahko nižja od na primer železniških postaj in nakladalnih površin, saj so večinoma grajene iz prostega kamenja (impedančni razred E). Če je mogoče razločiti le

med »mehkimi« in »trdimi« površinami, Kragh et al. (2006, 23) priporočajo uporabo impedančnih razredov D oziroma G (impedančni koeficient  $G = 1$  oziroma  $0,1$ ).

Preglednica 16: Razredi akustične impedance tal za različne kategorije rabe tal (prirejeno po Sohlman et al. 2004, 39-40).

Table 16: Impedance classes for the different land use classes (Sohlman et al. 2004, 39-40).

raba tal	impedančni razred
načrtno urejena območja	
bivalna območja	
gosto pozidano	G
redko pozidano	D
območja z gospodarsko rabo	
industrija, trgovina, javne storitve in vojaški objekti	G
cestno in železniško omrežje s pripadajočimi zemljišči	E
pristanišče	G
letališče	D
rudnik, odlagališče odpadkov in gradbišče	F
urejena poraščena zemljišča	E
urbano zeleno območje	E
športno ali rekreacijsko območje	E
kmetijsko zemljišče	D
gozd, grmičevje in travinje	
gozd	
listnati gozd	B
iglasti ali mešani gozd	C
gozd z vidnim skalovjem	E
grmičevje in travinje	
naravno travnišče	D
vresišče in ruševje	D
prehod med grmičevjem in gozdom	C
zemljišče z redkim rastjem ali brez njega	
plaže, peščene sipine in ravnine	D
skalovje in prodišče	F
zemljišče z redkim rastjem	E
pogorišče	C
ledenik in stalni sneg	B
mokrišča	
sladkovodna mokrišča	
močvirje ali barje s stoječo vodo	F
barje ali šotišče	E
slanovodna mokrišča	F
voda	G
privzeta vrednost	E

Za meritve specifične akustične impedance sem se pozanimal pri ustreznih sogovornikih na Zavodu za gradbeništvo, Akustični laboratorij (Ramšak 2009), Elektroinštitutu Milan Vidmar, Oddelek za vplive elektroenergetskih naprav na okolje (Rozman 2009), Fakulteti za strojništvo, Laboratorij za energetske delovne stroje in tehnično akustiko (Čudina 2009) in Fakulteti za elektrotehniko, Laboratorij za digitalno obdelavo signalov, slik in videa (Burnik 2009). Na nobeni instituciji meritev akustične impedance na prostem ne izvajajo, niti ne poznajo primera v Sloveniji, kjer bi to počeli, zato podrobna analiza kakovosti izdelanih impedančnih kart ni mogoča.

V nadaljevanju so navedene nekatere možnosti pridobitve karte impedance iz podatkov daljinskega zaznavanja, posebej sta obravnavani tudi že obstoječi bazi Dejanska raba zemljišč in Corine, izdelani z ročno fotointerpretacijo letalskih ortofoto podob oziroma podob sistema Landsat.

#### 4.7.1. Klasifikacija na podlagi podatkov laserskega skeniranja

V tem podpoglavju je opisana obdelava podatkov zračnega laserskega skeniranja z namenom pridobitve karte zvočne impedance tal.

##### uporabljeni podatki

- normiran model površja
- rastrski sloj povprečne intenzitete zadnjih in edinih odbojev
- rastrski sloj standardnega odklona višin odbojev
- oblak točk zračnega laserskega skeniranja

##### izvedba

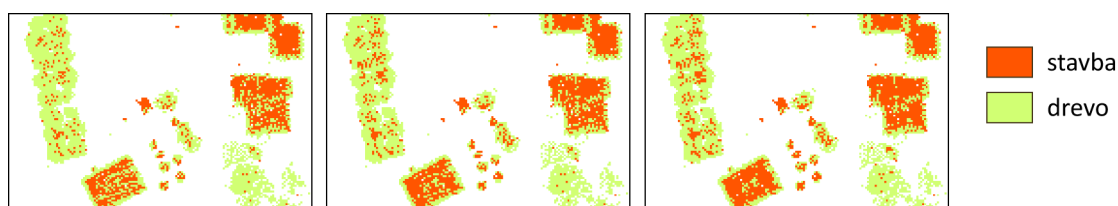
- razdelitev območja na nizke in visoke objekte (meja 2 m)
- delitev visokih objektov na stavbe in drevje glede na standardni odklon višin odbojev
- filtriranje (izboljšava) rezultata
- normalizacija intenzitete
  - rastrsko
  - v oblaku točk
- določitev cest, travinja, njiv in gradbišč glede s klasifikacijo intenzitete
  - nenadzorovana pikselska klasifikacija
  - nadzorovana pikselska klasifikacija
- združitev nizkih in visokih objektov ter dodatno filtriranje rezultata
- določitev povezave med razredi pokrovnosti in impedančnimi razredi

Z ustrezno pripravo in klasifikacijo podatkov zračnega laserskega skeniranja lahko dobimo podrobno karto pokrovnosti površinsko manjšega območja (Švab Lenarčič 2009). Avtorica navaja, da lahko na podlagi razčlenitve raziskovanega območja na objekte, ki so višji in nižji od enega metra, in s klasifikacijo intenzitete odbitega laserskega žarka slednjih dobro ločimo kategorije trava, asfalt in njive, z uporabo standardnega odklona višine odbojev v

posameznem pikslu, pa lahko ločimo med drevesi in stavbami (slika 45). Značilnost postopka je velika mera samodejnosti.

Preveriti sem želel, če lahko z nekoliko spremenjenim postopkom pridobim kategorije rabe tal, ki bi bile primerne za pretvorbo v impedančno karto.

*Postopek poobdelave* sem nekoliko prilagodil. Zaradi boljše razločljivosti kategorij sem za razdelitev na »visoke in nizke« objekte uporabil višino 2 m, za ločitev med drevjem in stavbami pa standardni odklon višine odbojev 0,4. Filtriral sem večstopenjsko s funkcijama združi in presej (angl. clump, sieve) in filtrom večine. Zaradi zaporednega odboja z roba strehe in tal je za obode stavb značilna razmeroma velik standardni odklon, zato so samodejno pripisani kategoriji drevja. Težavo sem naslovil s samodejnim povečanjem površine dobljenih stavb po drugi stopnji filtriranja za tri piksele navzven (1,5 m), kjer je višina večja od 2 m (postopek prikazuje slika 49, na strani 100).



Slika 45: Ločevanje stavb in dreves z različnimi mejami standardnega odklona višin odbojev: 0,25 (levo); 0,35 (na sredini); 0,40 (desno).

Figure 45: Differentiation of buildings and trees using different standard deviation threshold values: 0.25 (left); 0.35 (middle); 0.40 (right).

Določevanje pokrovnosti zemljiščem z relativno višino manjšo od 2 m s podatki laserskega skeniranja temelji na *klasifikaciji podobe intenzitete*. Intenziteta pri ZLS pove razmerje med jakostjo sprejete in oddane svetlobe (Song et al. 2002, 259). Največjo težavo pri razločevanju kategorij na podlagi intenzitete predstavlja njena spremenljivost, saj je odvisna od številnih vplivov in motečih dejavnikov (na primer razdalje med tarčo in senzorjem, vpadnega kota laserskega žarka, vrste odboja, atmosferskih pogojev in koeficienta odbojnosti tarče), ki so sicer že dodobra raziskani, vendar jih ne znamo odpraviti (Kosmatin Fras et al. 2007). To je v veliki meri posledica nepoznavanja parametrov snemanja in delovanja sistemov ZLS zaradi poslovnih skrivnosti izdelovalcev opreme in izvajalcev snemanj (Švab Lenarčič 2009, 112). Avtorji navajajo različne *metode usklajevanja intenzitete* med preletnimi linijami (Boyd 2007), s čimer je podoba intenzitete bolj enovita,

toda še vedno vsebuje šum, ki otežuje njeno nadaljnjo uporabo. Metode s katerimi jo skušamo nadalje popraviti so na primer glajenje, mozaičenje, normalizacija, filtriranje in uravnavanje histogramov (Švab Lenarčič 2009, 55), ki vsaka na svoj način vplivajo na kakovost podobe intenzitete. Zato moramo izbrati tisto, ki najbolj ustreza namenu uporabe in ki najmanj spremeni prvotne podatke. Odločil sem se za normalizacijo intenzitete med posameznimi preletnimi linijami. Kot osnovo sem za ožji testni območji izbral preletni liniji, ki sledita avtocesti, zato so vpadni koti majhni, in imata veliko gostoto točk. Preveril sem *stopnjo ujemanja faktorjev popravka vrednosti intenzitete* posameznih preletnih linij pri izračunu na oblaku točk in že pretvorjeno v rastrski zapis.

Vrednosti intenzitete sem najprej po posameznih preletnih linijah pretvoril v rastrske sloje z velikostjo celice 0,5 m. Velikost celice sem določil z ozirom na prostorsko ločljivost ostalih razpoložljivih podatkov, vendar sem preveril tudi ustreznost glede na povprečno gostoto točk snemanja, ki pri nobeni preletni liniji ni manjša od štirih točk na m<sup>2</sup>. Čeprav je bilo o vplivu ločljivosti rastra na natančnost prostorskega modeliranja napisanega že veliko, je odločitev za prostorsko ločljivost le redko utemeljena z naravno prostorsko spremenljivostjo vhodnih podatkov (Vieux in Needham 1993; Bishop et al. 2001). Upoštevana optimalna velikost celice temelji na predpostavki, da so podatki laserskega skeniranja približno enakomerno prostorsko razporejeni, da torej vsaki celici pripada vsaj najmanjše zadovoljivo število meritev. Hengl (2006) predlaga velikost celice, ki ustreza enačbi:

$$l = 0,0791 \cdot \sqrt{\frac{P}{n}}. \quad (9)$$

Pri tem so  $l$  dolžina stranice celice,  $P$  površina kartiranega območja (območja snemanja) in  $n$  število meritev (število odbojev). Nekoliko drugačno formulo predlagajo Sanchez (2006) ter Shary et al. (2002):

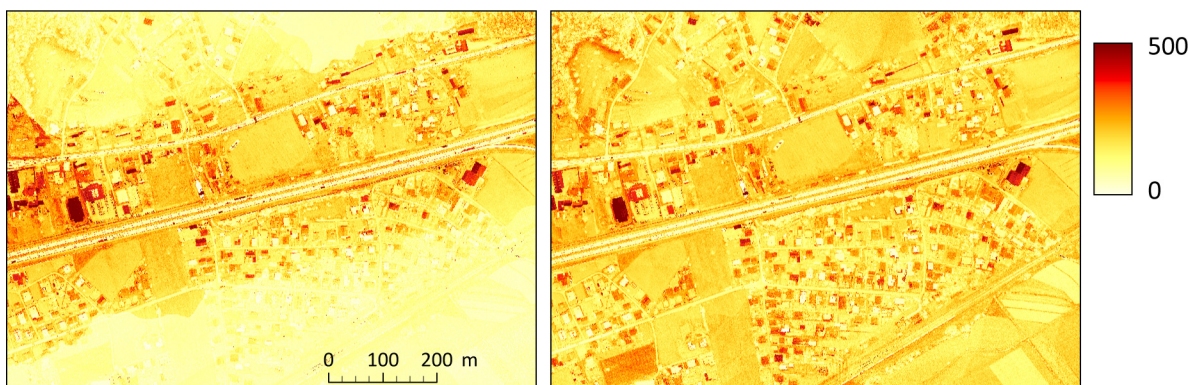
$$l \approx \sqrt{\frac{P}{n}}. \quad (10)$$

Enačbi se razlikujeta za približno faktor 10, ki je posledica tega, da Hengl teži h kartiranju kar največjega števila individualnih objektov. Za računanje velikosti celice rastra pri pretvorbi lidarskih podatkov je ustrenejša druga enačba. Rezultat zaokrožimo na najbližjo višjo enoto »standardne« velikosti celice (na primer 0,5, 1, 2, 5, 10, 25, 50, 100 m in



podobno) in tako dobimo optimalno ločljivost. Število meritev lahko prilagajamo glede na želeni rezultat, saj lahko na primer upoštevamo le prve ali zadnje odboje, določeno preletno linijo in podobno.

Zaradi izredno velikih najvišjih vrednosti intenzitete (prek 10.000), ki so posledica zrcalnih odbojev laserskega žarka neposredno v sprejemnik in ki lahko pomembno vplivajo na izračun povprečnih vrednosti in standardnih odklonov, sem vrednost 500 priredil vsem celicam, ki so jo presegale. Rastrskim slojem sem izračunal območja prekrivanja med izbranimi osnovnima preletnima linijama in ostalimi ter izračunal povprečne vrednosti in standardne odklone intenzitete (preglednica 18). Nato sem iz razmerja med povprečji osnovne in izbrane druge preletne linije določil faktor popravka intenzitete za to linijo. Z njim sem množil vrednosti intenzitete in posamezne rastre združil s povprečenjem na mestih prekrivanja. Tako pridobljena podoba intenzitete je bistveno bolj homogena (slika 46), kar potrjuje tudi statistika, saj je relativni standardni odklon vrednosti intenzitete celotne podobe glede na povprečno vrednost precej zmanjšan (38 %, prej 62 %) (preglednica 17).



Slika 46: Rastrska podoba intenzitete pred (levo) in po (desno) normalizaciji (ožje študijsko območje O2).

Figure 46: Raster intensity image before (left) and after (right) normalization.

Preglednica 17: Primerjava statistik rastrske podobe intenzitete pred in po normalizaciji.

Table 17: Statistics of raster intensity image before and after normalization.

	povprečje	standardni odklon
pred normalizacijo	137,9	84,9
po normalizaciji	181,1	68,2

Preglednica 18: Primerjava statistik intenzitete posameznih preletnih linij iz rastrskih podatkov za ožje študijsko območje.

Table 18: Statistics of individual flight lines from raster data.

ID linije preleta	povprečje	SO	povprečje osnovne linije	SO osnovne linije	faktor popravka
O2 7	60,5	29,9	172,5	71,6	2,85
O2 8	52,9	24,6	180,7	71,3	3,42
O2 9	62,5	32,3	192,1	78,3	3,07
O2 12	59,2	28,5	196,6	84,1	3,32
O2 25	53,6	26,3	185,3	75,7	3,46
O2 26	116,9	52,0	183,9	77,5	1,57
O2 33	202,4	97,7	198,4	89,0	0,98

Preglednica 19: Primerjava statistik intenzitete odbojev s prehitevalnega in voznega pasu avtoceste posameznih preletnih linij iz oblaka točk za ožje študijsko območje.

Table 19: Statistics of return intensities from point cloud for highway's overtaking and driving lanes.

območje in ID linije preleta	povprečje	SO	povprečje osnovne linije	SO osnovne linije	faktor popravka
O2 7	16,26	10,37	42,32	8,71	2,60
O2 8	14,58	5,41	45,80	10,94	3,14
O2 9	15,07	8,04	50,58	12,47	3,36
O2 12	13,75	5,89	52,91	12,38	3,85
O2 25	14,92	5,73	47,49	11,66	3,18
O2 26	29,28	8,21	46,53	11,16	1,59
O2 33	43,67	11,79	53,45	12,00	1,22

V oblaku točk sem povprečja in s tem vrednosti faktorjev popravkov računal na manjšem, bolj homogenem območju, to je na nekaj več kot kilometer dolgem odseku voznih in prehitevalnih pasov avtoceste, s katerega sem odstranil talne označbe in prevozna sredstva. Odstavnih pasov nisem vključil, ker se obrabni sloj po odbojnosti bistveno razlikuje od voznega in prehitevalnega (slika 39). Preostalih skrajnih vrednosti nisem odstranjeval.

Iz rastrskih in točkovnih presekov izračunane faktorje popravka sem testiral s Pearsonovim koeficientom korelacije. Ta je matematična in statistična številska mera, ki pove velikost linearne povezanosti dveh spremenljivk (recimo  $x$  in  $y$ ), merjenih na istem predmetu preučevanja. Koeficient je definiran kot vsota vseh produktov standardnih odklonov obeh vrednosti v razmerju s stopnjami prostosti oziroma kot razmerje med kovarianco in produktom obeh standardnih odklonov:

$$\rho_{x,y} = \frac{C_{x,y}}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (11)$$

kjer so  $C_{xy}$  kovarianca,  $\sigma_x$  standardni odklon spremenljivke  $x$  in  $\sigma_y$  standardni odklon spremenljivke  $y$ . Pogoji za računanje tega koeficienta je linearna odvisnost obeh spremenljivk, zavzema pa vrednosti med -1 in 1, pri čemer gre v prvem primeru za popolno negativno in v drugem za popolno pozitivno povezanost (Košmelj 2001, 94). Z različnimi metodama izračunani faktorji popravkov so zelo povezani, saj Pearsonov koeficient korelacije znaša 0,945 pri 95 % gotovosti. Na izbranem primeru se je torej izkazalo, da za računanje faktorjev popravka posameznih preletnih linij ni treba uporabiti dolgotrajnega postopka ugotavljanja povprečij glede na izbrano, razmeroma enovito, območje prekrivanja v oblaku točk, temveč lahko povprečja ugotavljamo v rastrskem modelu, na celotnem območju prekrivanja posameznih preletnih linij z osnovno.

Kot nadaljevanje raziskave v tej smeri bi bilo smiselno preveriti, kakšna je povezanost pri izbiri drugačnih območij primerjave in kakšni so rezultati poenotenja pri ugotavljanju povprečij glede na posamezne kategorije pokrovnosti.

*Digitalna klasifikacija* običajno razrede določi z upoštevanjem spektralnih informacij, to je »opazovanjem« sivih tonov na večspektralnih posnetkih (Oštir 2006, 175). Raven podrobnosti klasifikacije je odvisna od mnogih dejavnikov, na primer namena kartiranja, potrebovanih informacij, prostorske in radiometrične ločljivosti senzorja, okoljskih lastnosti proučevanega območja, analitičnih tehnik, ki naj bi jih uporabili, in podobno (Apan 1997, 1030). Glede na metodo dela klasifikacijo delimo na nadzorovano in nenadzorovano, z vidika obravnave območij na pikselsko in objektno oziroma segmentno. Glavna razlika med nadzorovano in nenadzorovano je način, kako ustvarimo spektralne podpise. Pri prvi operater določi manjša območja, kjer je razpoznaven določen tip rabe tal, računalniški program pa iz njih izračuna spektralne podpise. Pri drugi podpise ustvari program z matematičnim združevanjem (gručenjem) v  $n$ -razsežnem spektralnem prostoru (Oštir 2006, 175). Gručenje poteka statistično, z logiko mehkih množic ali z nevronskimi mrežami. Pri postopku nadzorovane klasifikacije je detajlno poznavanje proučevanega območja potrebno za določitev reprezentativnih vzorcev vsakega razreda pred procesom same klasifikacije, pri nenadzorovani klasifikaciji pa znanje o pokrajini potrebujemo za interpretacijo pomena rezultatov klasifikacije (Campbell 1996, 318). Razredi, ki jih z gručenjem dobimo so namreč

spektralno sorazmerno homogeni in predstavljajo zaključene celote, vendar pa ne vemo, kateremu tipu pokrovnosti posamezna gruča ustreza. To določimo s tako imenovanim prepoznavanjem razredov, postopkom, pri katerem izkušen opazovalec ugotovi, kateri razredi se na posnetku nahajajo in jim dodeli ustrezne oznake (Oštir 2006, 178-179). Pri nadzorovani klasifikaciji za ustvarjanje spektralnih vzorcev uporabimo svoje poznavanje zemeljskega površja. Na nek način računalnik »naučimo«, kaj je recimo voda in kaj trava, nato pa ta svoje znanje prenese na celoten posnetek. Prvi in najpomembnejši korak je izbira učnih vzorcev, to je območij z znanim tipom pokrovnosti. Operater jih praviloma označi na računalniškem zaslonu, lahko pa uporabimo tudi druge metode omejevanja, na primer terenski zajem koordinat s satelitskim določanjem lokacije. Program za obdelavo posnetkov nato izračuna spektralni podpis tipa pokrovnosti. Ta ponavadi obsega povprečne, največje in najmanjše vrednosti, standardne odklone in podobno v vseh kanalih, ki jih imamo na razpolago. Klasifikacija vsak piksel primerja s poznanimi podpisi. V izhodni tematski sloj zapišemo vrednost razreda, ki je pri danih vhodnih podatkih najverjetnejši. Kakovost same klasifikacije je odvisna od uporabljenega algoritma, še bolj pa od vhodnih podatkov (Oštir 2006, 179-180).

Z napredkom v ločljivosti senzorjev so postale velikosti piksla občutno manjše od povprečne velikosti proučevanih objektov. Klasifikacijske tehnike, ki temeljijo na analizi spektralnih lastnosti posameznih slikovnih elementov, so zato postale nezadostne in razvit je bil nov pristop, ki temelji na analizi okolice in združuje postopka segmentacije in razvrščanja – objektna klasifikacija. Segmentacija podob zniža raven detajlov, zmanjša kompleksnost podob in naredi njihovo vsebino bolj razumljivo. Izdela regije oziroma segmente, ki jim lahko pripišemo številne lastnosti, poleg spektralnih še teksturne in prostorske (na primer velikost, oblika, sosedstvo), ter jih v drugem koraku analiziramo in razvrstimo v razrede – spremenimo v geografske objekte (Lang 2008). Tipična težava je izbira ravni segmentacije, saj ne obstaja edinstvena prostorska ločljivost za razlikovanje vseh geografskih entitet, ki gradijo pokrajino, in je pomembnost posamezne meje odvisna tudi od merila (Castilla in Hay 2008, 103). Novejše študije zato poudarjajo nujnost prepletenosti segmentacije in klasifikacije v skupen, ponavljajoč proces, saj znanje, ki je ga pridobimo ob klasifikaciji koristno že ob sami segmentaciji, hkrati pa segmentacija bistveno vpliva na kakovost in izvedbo klasifikacije (Baatz et al. 2008). Zato so bile razvite tudi posebne metode

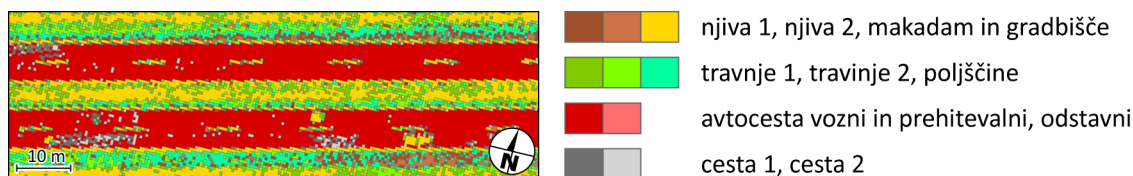
ocenjevanja kakovosti izvedbe (Neubert et al. 2008) Običajno je zaželena določena raven prekomerne segmentacije, saj je malo verjetno, da vsi označeni objekti pripadajo isti hierarhični ravni, četudi privzamemo, da vsak segment pripada določeni prepoznavni entiteti. Segmente nato klasificiramo z nadzorovano klasifikacijo z izbiro učnih vzorcev in tradicionalnimi klasifikacijskimi algoritmi, s pristopom na osnovi odločitvenega drevesa, nevronskih mrež ali mehkih množic.

Z upoštevanjem pomožnih informacij, pridobljenih iz knjig, zemljevidov, statističnih tabel, terenskega dela ali drugih virov, je mogoče kakovost klasifikacije dodatno izboljšati. Pisno gradivo se lahko nanaša neposredno na opazovano območje ali na druga, včasih zelo oddaljena a geografsko sorodna območja, s podobnimi ekološkimi, talnimi, klimatskimi, rastlinskimi in reliefnimi lastnostmi. Pridobljene informacije lahko upoštevamo že med samim procesom klasifikacije, če pa to ni mogoče oziroma ne prinese pričakovanih rezultatov, pa tudi v poklasifikaciji v obliki odločitvenega drevesa.

Ponavadi je treba zaradi omejitev pri razpoložljivem času in sredstvih skleniti kompromis pri številu kategorij, saj s tem zmanjšamo zapletenost obdelave in poobdelave. V primeru klasifikacije območij nižjih od dveh metrov in le na podlagi sloja intenzitete je kompromis dokaj skrajn, saj se da razmeroma dobro ločiti le asfalt od drugih površin. Preizkusil sem nenadzorovano in nadzorovano pikselo klasifikacijo ter nadzorovano objektno klasifikacijo sloja intenzitete ter intenzitete in standardnega odklona višin odbojev.

Pri nenadzorovani klasifikaciji sem razvrščal v različno število razredov (med 3 in 20) ter primerjal rezultate. Najboljši so rezultati klasifikacije dvoslojnega rastra v štiri razrede, pri čemer lahko dva razporedimo v razred z »nižjo« in dva v razred z »višjo« impedanco. Ker sem ločeval le med razmeroma skrajne kategorije – asfalt z zelo nizko odbojnostjo, makadam in gradbišča z visoko odbojnostjo ter ostala zemljišča, ki so po odbojnosti nekje vmes (na primer travinje, poljščine, grmičevje) – so rezultati sicer zadovoljivi, vendar se zaradi že omenjene razlike v odbojnosti voznega in odstavnega avtocestnega pasu pojavlja težava, saj slednjega ni bilo mogoče izločiti. Problem je prisoten tudi drugod, pri ločevanju asfalta od zemljišč z odkrito prstjo. Rešitev sem iskal v nadzorovani klasifikaciji v deset razredov (z namenom kasnejšega združevanja v tri kategorije) z metodo največje verjetnosti. Njene dobre lastnosti, zlasti velika točnost, imajo bistveno prednost pred slabimi, na primer občutljivostjo na kakovost učnih vzorcev (Campbell 1996, 339). Za vsak razred sem izbral

več učnih vzorcev. Čeprav je rezultat v splošnem boljši od nenadzorovane klasifikacije, omenjene težave to ni rešilo. Še več, izkazalo se je, da odstavnega pasu na ta način dejansko ni moč izdvojiti, saj v omenjeno kategorijo ni bil klasificiran niti en piksel, pač pa so bila območja odstavnih pasov razporejena v vse ostale kategorije (slika 47). Težave ne odpravi niti objektna klasifikacija, saj je v tem primeru preveč območij klasificiranih kot cesta.



Slika 47: Podatki popravljene intenzitete območij z relativno višino nižjo od 2 m klasificirani z nadzorovano pikselsko klasifikacijo. Izsek prikazuje del avtoceste. Napačna klasifikacija odstavnih pasov je dobro vidna.

Figure 47: Intensity image of areas lower than 2 m classified with supervised pixel classification. Area represents a section of a highway. Incorrect classification of a shoulder is clearly visible.

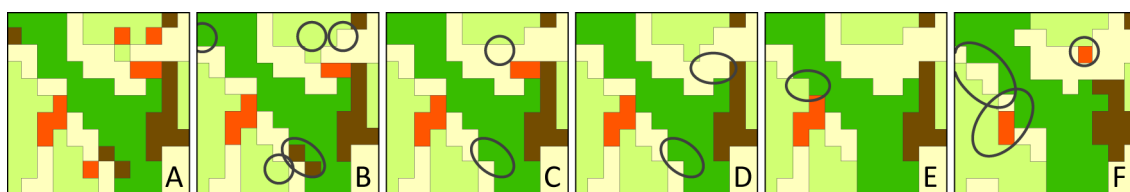
Rezultat ugotovitve študije, ki jo je izvedla Švab Lenarčič (2009), torej, da se asfalt in »lepa« trava med seboj zelo dobro ločita, da lahko dobro izločimo njive in težko razločimo asfalt od »poteptane« trave in trave, skozi katero se vidi velik del zemlje, moje analize potrjujejo le deloma.

Možna rešitev je zelo podoben pristop, ki ga opisujejo Clode et al. (2007). Model cest izdelajo z izločevanjem točk na podlagi normiranega modela površja in nadaljnjo klasifikacijo z odločitvenim drevesom. Odboji pripadajo cestišču, če ležijo v določenem pasu višinske oddaljenosti od modela reliefa (s tem so izločene tudi vse točke na mostovih in dvignjenih cestah), imajo vrednosti intenzitete na določenem intervalu in presežejo določen prag krajevne gostote točk (krajevna gostota točk, ki ležijo sredi cestišča je blizu 100 %, tistih na robu 50 %, in tistih v kotu 90° ovinka 25 %). Odločitveno drevo lahko izdelamo za vsak tip cestnega obrabnega sloja posebej. Zaradi programskih omejitev metode nisem uspel preveriti.

Z naprednejšo obdelavo podatkov laserskega skeniranja lahko, poleg že opisanih kategorij, določimo tudi vodo (s profiliranjem in klasifikacijo glede na višino, nagib, intenziteto, dolžino segmenta, razmeščenost odbojev in odsotnost odbojev (Brzank et al. 2006) ali na klasifikacije intenzitete in kombinacije s klasifikacijo posnetkov ortofoto (Švab Lenarčič 2008, 104-106) ter ločujemo med listavci in iglavci (na primer na podlagi različne razporeditve gostote odbojev po višinskih plasteh), pri čemer je dosežena natančnost

rezultata poleg tehničnih značilnosti snemanja odvisna še od obdobja snemanja (olistanosti), že brez kombiniranja z optičnimi podatki pa lahko preseže 90 % (Liang et al. 2007, 256; Hyyppä et al. 2009, 352-354).

Za rezultat pikselske klasifikacije so značilne motnje ali »šum«, ki ga pogosto izločujemo s *filtriranjem*. Kot pri vsaki transformaciji, se tudi pri filtriranju določen del informacij izgubi, zato je treba poznati prednosti in slabosti različnih načinov filtriranja in njihovih kombinacij. V postopku poklasifikacije (zlasti pikselske, vendar tudi objektne) se pogosto uporabljajo filtri večine. Velikost filtra določi uporabnik, tipično znaša med tri krat tri in sedem krat sedem pikslov. Opazna lastnost omenjenega filtriranja je, da območja z določenim razredom delujejo bolj zaključeno, homogeno oziroma kompaktno, kot tudi, da se pri tem ne izognemo posamičnim pikslom. Prihaja tudi do pomembnih sprememb v lokaciji razredov predvsem na mejah med njimi, torej tam kjer se vrednosti razredov hitro spreminjajo (slika 48). Za zagotovitev filtrirane podobe brez območij, ki ne dosegajo najmanjše predpisane površine, je zato nujna nadgradnja z uporabo funkcij »združi« in »presej« (Kokalj 2004, 31). Funkcija »združi« z analizo štirih ali osmih sosedov označi in oštevilči posamične skupine pikslov. Na podlagi analize histograma nato s funkcijo »presej« izdelamo nov raster v katerega se zapišejo le gruče s številom pikslov, večjim od uporabniško določene najmanjše vrednosti.

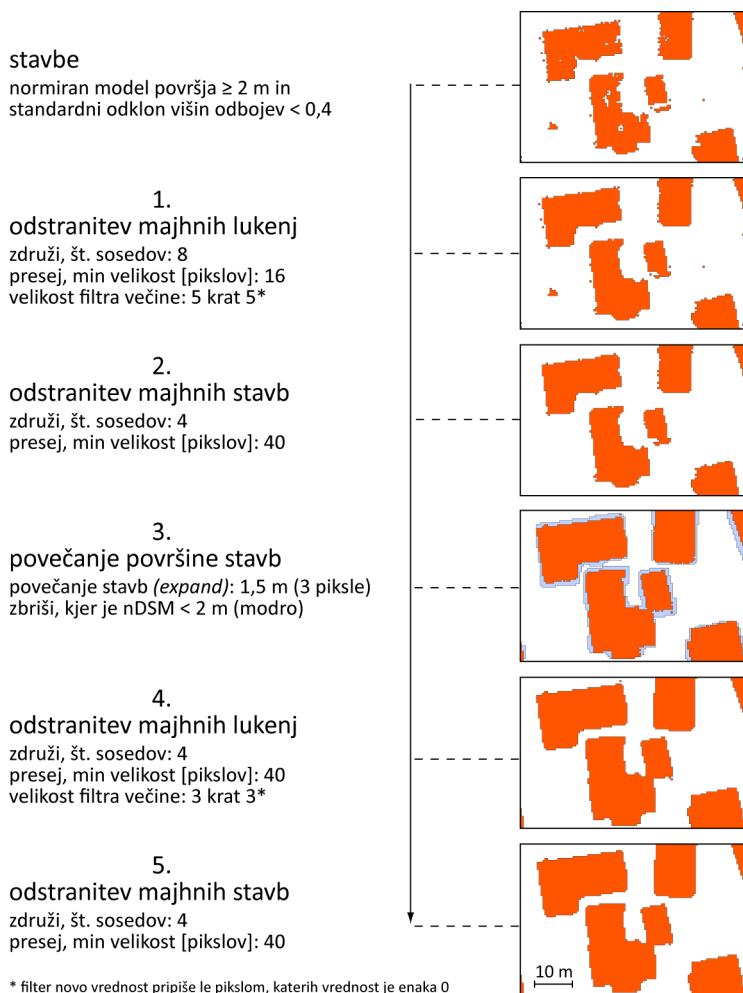


Slika 48: Različni načini filtriranja. Slika brez filtriranja (A), izločevanje posamičnih pikslov in nadomeščanje njihovih vrednosti s filtri večine (metoda osmih sosedov (B), metoda štirih sosedov (C)), izločevanje skupin pikslov manjših od tri in nadomeščanje njihovih vrednosti s filtri večine (metoda osmih sosedov (D), metoda štirih sosedov (E)), filtriranje celotne slike s filtrom večine velikosti tri krat tri (F). V izogib težavam pri filtriranju robov so slike izrezi večjih podob (Kokalj 2004, 32). Označene so zanimivejše spremembe.

Figure 48: Filtering procedures with different settings. Non-filtered image (A), filtering out individual pixels with eight (B) and four (C) neighbours, filtering groups of two pixels with eight (D) and four (E) neighbours, normal three times three majority filter (F).

S prilagojenim filtrom večine sem filtriral večkratno, po posameznih kategorijah in združeno. Slika 49, slika 50 in slika 51 prikazujejo posamezne korake obdelave, nastavitve filtrov in rezultate. Težil sem k odstranitvi vseh stavb oziroma »šuma« v kategoriji stavb s površino manjšo od 40 pikslov oziroma  $10 \text{ m}^2$  in posamičnih dreves s površino manjšo od 80

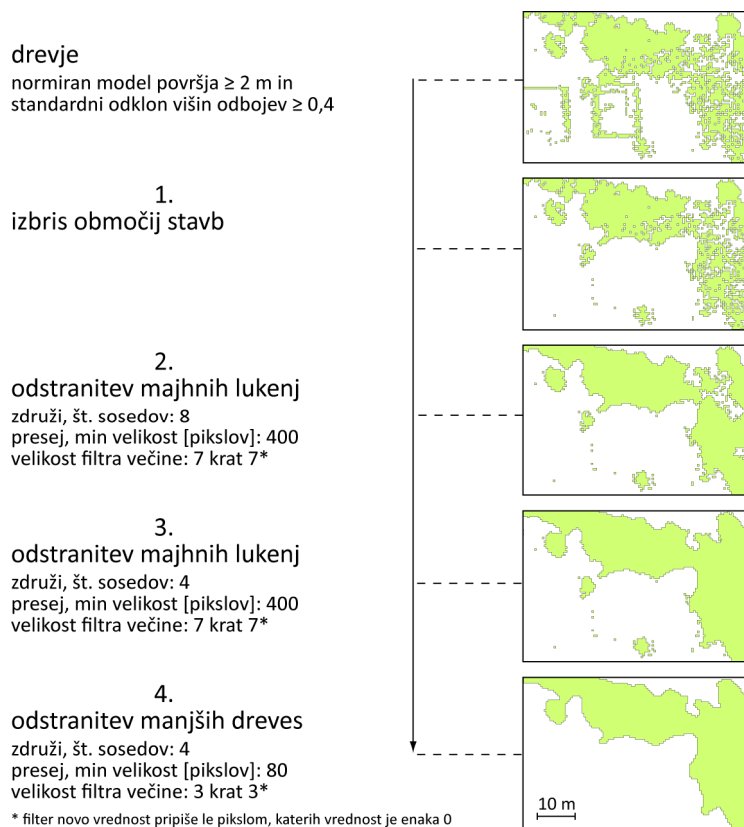
pikslov, kar približno ustreza premeru krošnje 5 m oziroma površini 20 m<sup>2</sup>. Slika 51 prikazuje postopek filtriranja nadzorovane klasifikacije podobe intenzitete. Stavb nisem dodatno filtriral, pri ostalih kategorijah sem odstranil vsa območja manjša od 100 m<sup>2</sup>.



Slika 49: Stopnje in parametri filtriranja razreda stavb klasifikacije lidarskih podatkov.

Figure 49: Filtering parameters of building class from lidar data classification.





Slika 50: Stopnje in parametri filtriranja razreda gozd klasifikacije lidarskih podatkov.

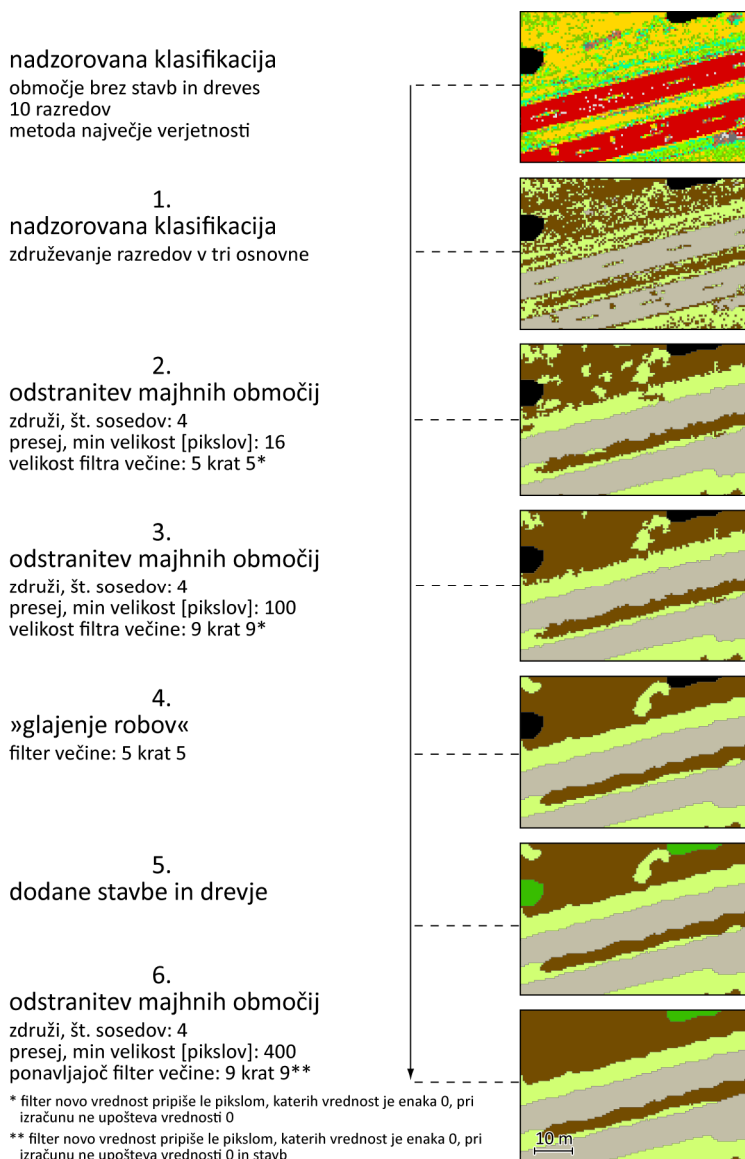
Figure 50: Filtering parameters of forest class from lidar data classification.

Preglednica 20: Pretvorba kategorij pokrovnosti\* pridobljenih iz lidarskih podatkov v razrede akustične impedance.

Table 20: Translation of land cover map from lidar data to impedance classes.

opis	impedančni razred
stavba	G
drevje oziroma gozd	C
asfaltirana cesta	G
makadam, gradbišče, parkirišče, prst	E
poljščine, travinje	D

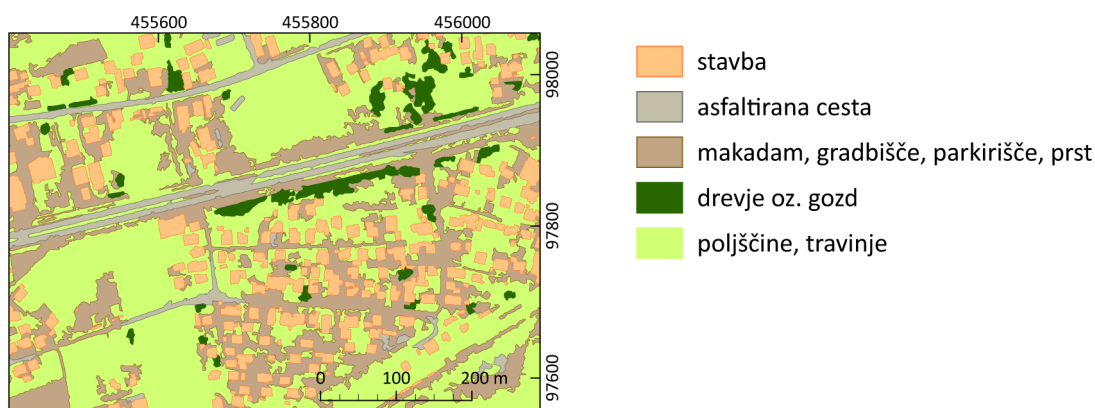
\* razred voda ni bil posebej klasificiran



Slika 51: Stopnje in parametri filtriranja združenih razredov klasifikacije lidarskih podatkov.

Figure 51: Filtering parameters of combined classes from lidar data classification.

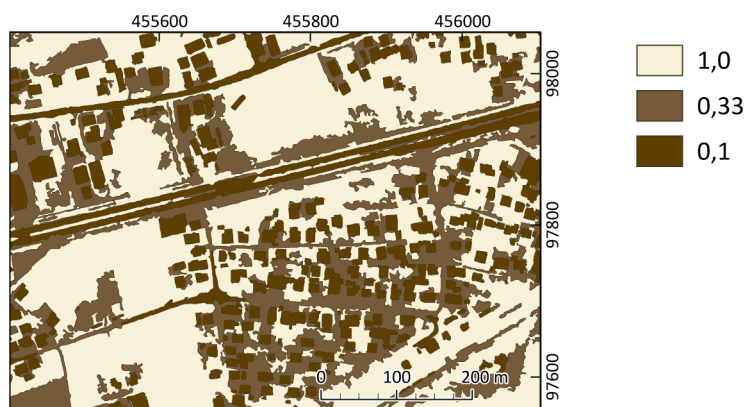
Na ta način pridobljeno karto pokrovnosti (slika 52) sem spremenil v vektorsko obliko, jo preoblikoval v razrede zvočne impedance (preglednica 20) in pretvoril v impedančni koeficient G (slika 53).



Slika 52: Izsek karte pokrovnosti, izdelane iz lidarskih podatkov.

Figure 52: A part of the lidar land cover map.

Za karto impedance je na podlagi podatkov ZLS mogoče pridobiti informacije le o nekaj razredih, temelječih na pokrovnosti (na primer za zgradbe, gozd), ki so sicer lokacijsko in vsebinsko zelo natančne, vendar ostaja nerešeno vprašanje (ne)določljivosti ostalih kategorij. Zanimivo je, da klasifikacija asfalta, ki se v drugih raziskavah tipično navaja, kot razmeroma lahko določljiv razred (na primer Clode et al. 2007), popolnoma odpove pri določevanju avtocestnih odstavnih pasov.



Slika 53: Izsek karte akustične impedance izdelane iz lidarskih podatkov in izražene z impedančnim koeficientom G.

Figure 53: The equivalent G factor acoustic impedance map created from a lidar data land cover map.

## 4.7.2. Pikselska klasifikacija satelitskih posnetkov Landsat

Razdelek opredeljuje postopek obdelave satelitskih posnetkov Landsat z namenom pridobitve karte akustične impedance zvoka.

### uporabljeni podatki

- satelitski posnetki Landsat
- digitalni model višin 12,5 m in iz njega izračunani nagibi

### izvedba

- nadzorovana pikselska klasifikacija satelitskih posnetkov
- izboljšava z odločitvenim drevesom na podlagi višin in nagibov
- rastrska posplošitev rezultata (filtriranje)
- pretvorba v vektorski zapis
- odstranitev nazobčanja
  - algoritem Douglas-Peucker
  - algoritem Wang-Muller
  - Bezierove krivulje
  - B-zlepki
- določitev povezave med razredi pokrovnosti in impedančnimi razredi

Ugotavljanje rabe tal oziroma pokrovnosti iz satelitskih posnetkov je ena izmed osnovnih in najpomembnejših nalog daljinskega zaznavanja (Lillesand in Kieffer 1994; Campbell 1996; Oštir 2006). Na začetku interpretacijskega procesa imamo veliko možnih načinov (poti, postopkov) za analizo satelitskih podatkov, kajti pretehtati in odločati se moramo o številnih elementih in dejavnikih klasifikacije:

- izboru časovne serije satelitskih podatkov,
- izboru podatkov različnih satelitskih senzorjev,
- izboru različnih klasifikacijskih metod (algoritmov),
- različnih možnih območjih,
- o možnih različnih sosledjih uporabe klasifikacijskih metod (Pavlin 1998, 7).

Zaradi razmeroma dobrih spektralnih (sedem večspektralnih kanalov in pankromatski) in prostorskih (ločljivost 30 m krat 30 m večspektralni in 15 m krat 15 m pankromatski) lastnosti, pokritosti ozemlja, prilagojenih in posebej zanje razvitih metod obdelave in programske opreme, veččasovne razpoložljivosti in ogromnega, več desetletij obsegajočega, arhiva so za tovrstne naloge zelo priljubljeni sateliti Landsat. Vsi skenerji zajemajo podatke v pasu, širokem 185 km, pri čemer je polna scena velika 185 x 185 km (Oštir 2006, 88-92; Kramer 2002, 448).

Kljub temu, da sočasna obdelava veččasovnih posnetkov pripomore k boljši (raz)ločljivosti kategorij pokrovnosti (Kokalj in Oštir, 2007), sem se odločil uporabiti en sam posnetek, saj menim, da bi bila obdelava večjega števila časovno prezahtevna in za potrebe naloge ne bistvena. Posnetek osrednje Slovenije (190/28), z datumom 10.9.2000, prevzorčenim na ločljivost 25 m, sem obdelal po metodi, ki je podrobneje opisana v Kokalj (2004) ter Kokalj in Oštir (2006), zato v naslednjih odstavkih navajam le najpomembnejše značilnosti.

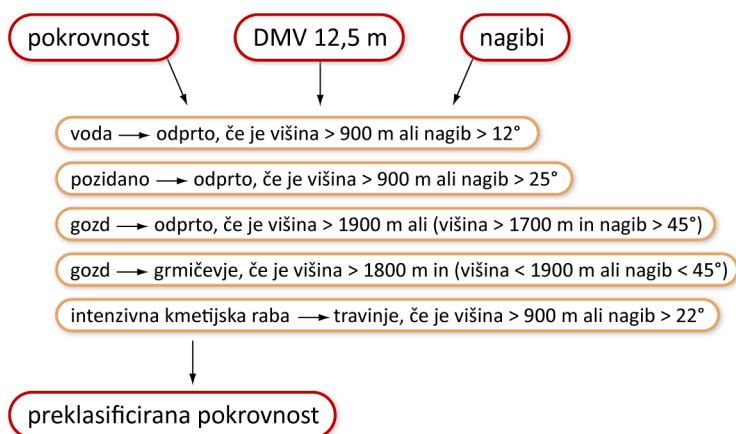
Uporabljene so naslednje kategorije pokrovnosti: listnati gozd; iglasti gozd; grmičevje in zaraščanje (grmičevje, prehod iz gozda v travnik, zaraščajoči travniki, nizki gozd); ekstenzivna travniška raba (pašniki in košenice, visokogorsko travinje, barjanski travniki); intenzivna kmetijska raba (njive z različnimi kulturami, vrtovi, vinogradi, sadovnjaki, intenzivni travniki, čredinski pašniki); pozidana in sorodna zemljišča (mesta, vasi, industrijske površine, širše prometnice in parkirišča, gradbišča); voda (jezera, zaježitve, reke); odprto (skalnato visokogorje, kamnolomi in peskokopi). Zaradi omejevanih dejavnikov, ki otežujejo klasifikacijo (na primer prostorska in časovna spremenljivost spektralnega podpisa zaradi reliefne razčlenjenosti, drobne zemljiškoposestne strukture, pestrosti kamninske in pedološke sestave, mikroklimatskih razmer in podobnega), se skušamo dejanskemu stanju le kolikor mogoče približati.

V opisanem primeru so bili učni vzorci določeni s samodejnim in ročnim omejevanjem, kategorija odprto pa je bila pridobljena naknadno v procesu poklasifikacije. Kakovost vzorcev je bila iterativno preverjena z več analizami (grafična predstavitev spektralnih odbojev vzorcev, analiza ločljivosti vzorcev, prekrivanje v spektralnem prostoru, samoklasifikacija in testna klasifikacija manjših območij), neustrezni vzorci pa so bili zamenjani. Kot glavni klasifikator je bila uporabljena metoda največje verjetnosti.

Težave pri klasifikaciji pokrovnosti so se pojavile predvsem pri ločevanju grmičevja od zemljišč z intenzivno kmetijsko rabo. Zaradi podobnosti in prepletanja spektralnih podpisov omenjenih kategorij je bilo treba učne vzorce večkrat preveriti in zamenjati. Težavo je predstavljalo razlikovanje med pozidanimi zemljišči in zemljišči z odkrito prstjo, vendar je bila dokaj uspešno premoščena z »mehko« klasifikacijo v dva sloja. Ta celicam v prvem sloju pripiše najbolj verjetno pripadnost določenemu učnemu vzorcu in celicam v drugem sloju najbolj verjetno pripadnost enemu izmed preostalih učnih vzorcev. Celicam, ki so bile

v prvem sloju označene kot pozidana zemljišča in v drugem sloju kot katera druga kategorija, je bil atribut spremenjen v kategorijo iz drugega sloja.

Kakovost klasifikacije v študiji je bila izboljšana z omejevanjem razredov z višino in strmino pobočij. Mejne vrednosti so bile ugotovljene s pregledom literature (Gams 1960; Orožen Adamič et al. 1995, 9-10; Vrišer 1995, 37; Perko 1998, 84; Kladnik 1999, 124-125), odločitveno drevo omejevanja pa prikazuje slika 54.



Slika 54: Odločitveno drevo omejevanja kategorij z višino in nagibom.

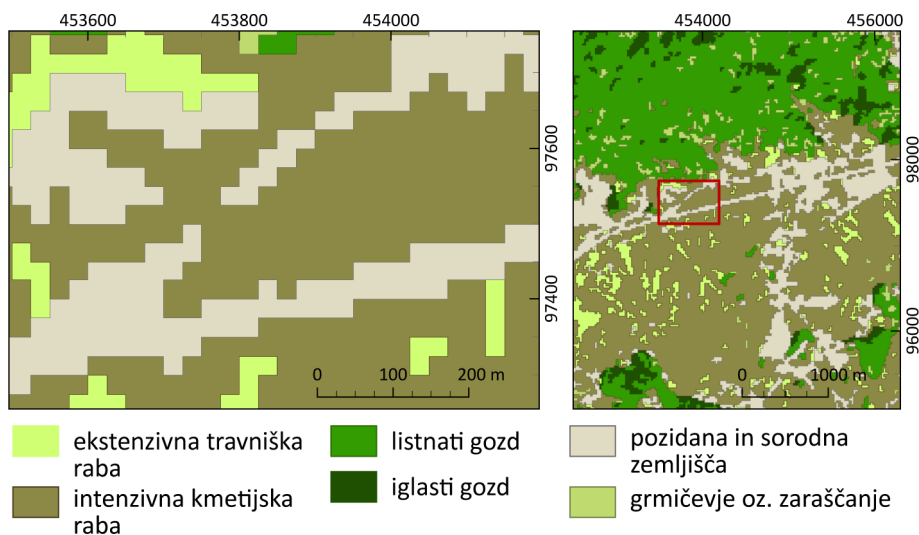
Figure 54: Decision tree for reclassification using digital elevation and slope models.

Za delno posplošitev sem uporabil prilagojen filter večine (podrobneje opisan na strani 99). Izločil sem skupine, manjše od treh pikslov, ki sem jih določil s funkcijo »združi« upoštevaje štiri sosede, uporabil sem filter večine velikosti tri krat tri piksle.

Natančnost zemljevida, ocenjena na podlagi vzorčnih točk, primerjanih s stanjem na posnetkih ortofoto (iz let 1998 do 2000), presega 92%, kar je zelo dober rezultat (Foody 2002).

Karto pokrovnosti (slika 55) sem spremenil v vektorsko obliko, pri čemer imajo poligoni pravokotne robove, ki sledijo pikslom. V primeru razmeroma velikih pikslov (glede na želeno merilo karte) *odstranitev nazobčanja* z orodji, ki so na voljo v programu ArcGIS, ni zadovoljiva niti z algoritmoma Wang-Muller in Douglas-Peucker, niti s posebej razvitim algoritmom, ki se uporablja prav v te namene in omogoča povratno pretvorbo (ESRI Help 2 2008) (slika 56). Zato sem uporabil posploševanje z Bezierovimi krivuljami in B-zlepki (angl. splines), ki podajo bolj »organske« oblike, mnogo bolj primerne za posploševanje

pikselske klasifikacije srednje ločljivih posnetkov, kjer ostri robovi niso tako pomembni, saj razredi označujejo območja (regije) in redkeje objekte z ostrimi koti.

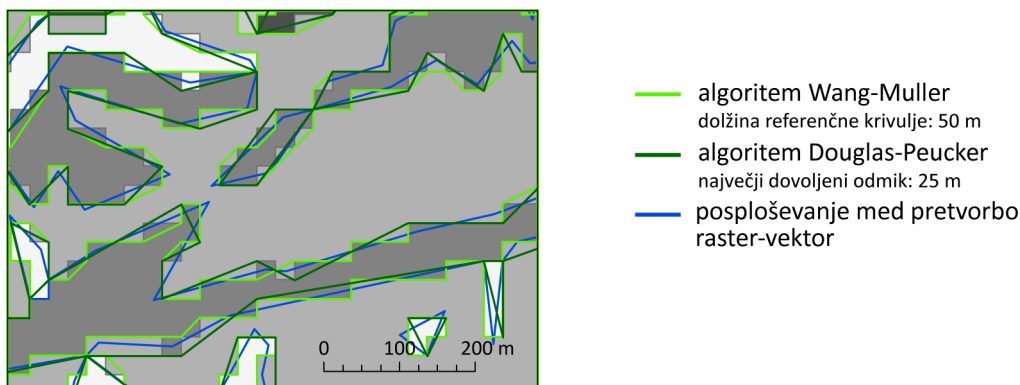


Slika 55: Izsek iz karte pokrovnosti izdelane s klasifikacijo posnetka Landsat. Na desni sliki je prikazano celotno študijsko območje. V legendi so le kategorije, prikazane na tem delu karte.

Figure 55: A part of the land cover map from Landsat image classification. Only visible categories are represented in the legend.

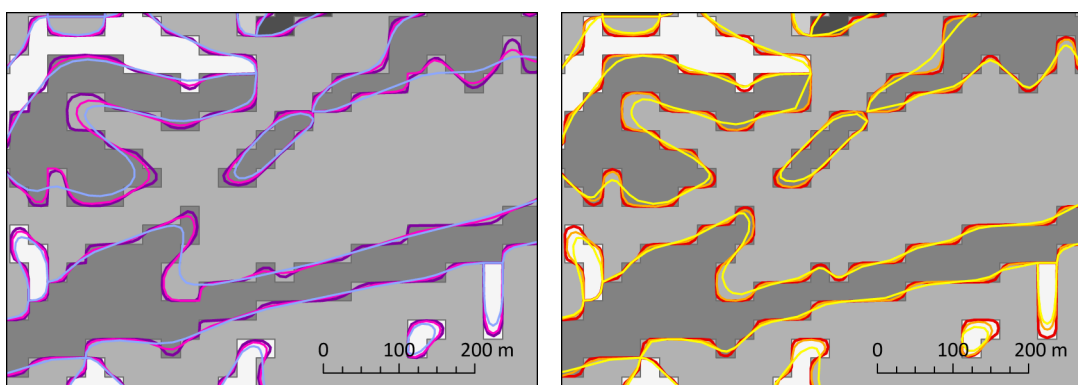
Bezierova krivulja se v začetni in končni točki tangento dotika kontrolnega oboda oslonilnih točk in vedno poteka znotraj tega oboda. Začetek in konec krivulje sta s tem fiksno določena, medtem ko s spreminjanjem položaja vmesnih oslonilnih točk spreminjamo obliko krivulje (Rogers, 2001). Bezierove krivulje so približek prvotne oblike in uporabne za posploševanje linij (poligonov) z veliko točkami, ki zadržijo krivulje blizu prvotne oblike. V primeru, da teh ni dovolj, jih lahko zgostimo, torej dodamo nove, saj se sprememba položaja oslonilne točke odrazi samo na delu celotne Bezierove krivulje, kar omogoča krajevni nadzor nad njeno obliko (Skrobo 2004, 14).

Zapis ESRI Shapefile ne podpira pravih Bezierovih krivulj, zato so shranjene linije le njihov približek. Stopnja približka (ohranjeno število točk) je definirana s stopnjo glajenja in naknadnega odstranjevanja točk z algoritmom Douglas-Peucker. Stopnja glajenja opredeli število točk v krivulji in je množitelj števila točk, saj da število točk prvotne linije pomnoženo s stopnjo glajenja število točk zglajene krivulje, pred odstranjevanjem odvečnih točk (Tchoukanski 2009). Odstranjevanje le-teh je koristno; algoritem Douglas-Peucker pa v tem primeru nalogo dobro opravi (slika 57).



Slika 56: Posploševanje rastrskih podatkov, pretvorjenih v vektor, med samo pretvorbo (modro) in z algoritmom Wang-Muller (zeleno).

Figure 56: Simplification of vector polygons, created from a raster, with Wang-Muller algorithm (green) and an especially designed algorithm implemented in ArcGIS (blue).



#### Bezierove krivulje

- stopnja glajenja: 3  
goščenje pred glajenjem: 5 m  
posploševanje z algoritmom Douglas-Peucker: 1 m
- stopnja glajenja: 3  
goščenje pred glajenjem: 10 m  
posploševanje z algoritmom Douglas-Peucker: 1 m
- stopnja glajenja: 3  
goščenje pred glajenjem: 25 m  
posploševanje z algoritmom Douglas-Peucker: 1 m

#### B-zlepki

- stopnja glajenja: 3, stopnja prostosti: 5  
goščenje pred glajenjem: 25 m  
posploševanje z algoritmom Douglas-Peucker: 1 m
- stopnja glajenja: 3, stopnja prostosti: 10  
goščenje pred glajenjem: 25 m  
posploševanje z algoritmom Douglas-Peucker: 1 m
- stopnja glajenja: 3, stopnja prostosti: 10  
goščenje pred glajenjem: 50 m  
posploševanje z algoritmom Douglas-Peucker: 1 m

Slika 57: Posploševanje rastrskih podatkov, pretvorjenih v vektorje, z Bezierjevimi krivuljami (levo) in B-zlepki (desno).

Figure 57: Simplification of vector polygons, created from a raster, with Bezier curves (left plate) and B-splines (right plate).

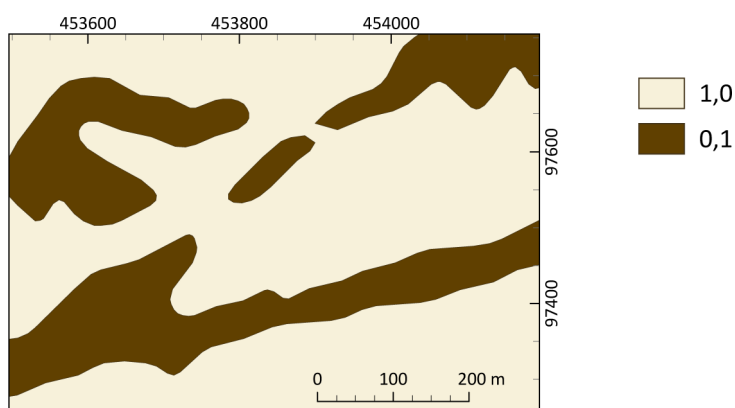
Zlepek (angl. spline) je v matematiki posebna funkcija, ki je definirana s polinomi po odsekih med dvema točkama. V interpolacijskih problemih se zleпки bolj priljubljene od polinomov, saj dajo podobne rezultate in se izognejo Rungejevemu pojavu, ki je značilen za polinome višjih stopenj, torej so manj dovzetni na silovite oscilacije med danimi točkami. Funkcije zlepkov za glajenje so nekakšna posplošitev interpolacijskih zlepkov. Zasnovane so



z namenom minimiranja obtežene kombinacije povprečnih kvadratov napak približkov na opazovanem območju in mere razgibanosti. Največkrat se uporablja kubične zlepke katerih cilj je zvezna funkcija drugega odvoda (Press et al. 2007, 111-112). V računalniško podprtem kartiranju in računalniški grafiki so zlepki zelo priljubljeni zaradi preproste tvorbe, enostavnosti in točnosti preračunavanja ter zmožnosti posploševanja zapletenih oblik s prilagajanjem krivulj in interaktivnim oblikovanjem krivulj (Rogers 2001). Poznamo več vrst zlepkov, ki sledijo različnim poimenovanjem, med osnovne sodijo B-zlepki (angl. krajše za basis spline) (Boor 2001). Kot pri Bezierovih krivuljah, tudi pri B-zlepkih krivulje ne potekajo čez oslonilne točke, razen prve in zadnje, ter ležijo v konveksnem obodu prvotnega poligona. Prvotnim linijam sledijo bolje kot Bezierove krivulje, v odvisnosti od stopnje prostosti pa se glajenje vrši le v bližini točk. Stopnja prostosti zato pove kako blizu prvotni liniji bo izračunana krivulja (Tchoukanski 2009).

Slika 57 prikazuje del glajenj, ki sem jih izdelal z različnimi nastavitvami algoritmov. Po vizualni in statistični analizi (primerjava sprememb površine kategorij) sem se odločil za obdelavo z B-zlepki, s stopnjo glajenja 3, stopnjo prostosti 10, goščenjem pred glajenjem 50 m in posploševanjem s prostostno stopnjo 1 m, saj ima rezultat ugodno razmerje med posplošitvijo in pravilnostjo predstavitve.

Tako pridobljeno karto pokrovnosti sem preoblikoval v razrede zvočne impendace (preglednica 21) in te pretvoril v impedančni koeficient G (slika 58).



Slika 58: Izsek karte akustične impendace izdelane s klasifikacijo satelitskih posnetkov Landsat in izražene z impedančnim koeficientom G.

Figure 58: The equivalent G factor acoustic impedance map created from a Landsat satellite land cover map.

Preglednica 21: Pretvorba kategorij pokrovnosti pridobljenih iz lidarskih podatkov v razrede akustične impedance.

Table 21: Translation of land cover map from lidar data to impedance classes.

opis	impedančni razred
iglasti gozd	C
listnati gozd	B
grmičevje oziroma zaraščanje	C
ekstenzivna travniška raba	C
intenzivna kmetijska raba	D
pozidana in sorodna zemljišča	G

### 4.7.3. Objektna klasifikacija ortofoto posnetkov

Za izdelavo karte zvočne impedance tal lahko uporabimo tudi objektno klasifikacijo ortofoto posnetkov.

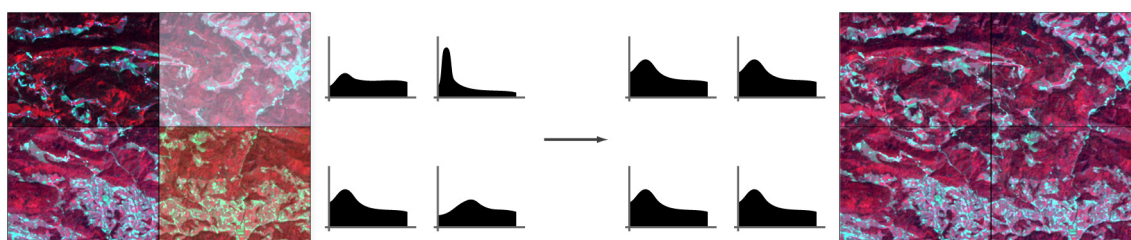
#### uporabljeni podatki

- digitalni letalski ortofoto posnetki (modri, zeleni, rdeči in infrardeči kanal)
- normiran model površja
- rastrski sloj standardnega odklona višin odbojev

#### izvedba

- združitev kanalov ortofoto posnetkov
- izenačevanje histograma in mozaičenje
- objektna klasifikacija (tri kombinacije podatkov)
- rastrska posplošitev rezultata (filtriranje)
- pretvorba v vektorski zapis
- določitev povezave med razredi pokrovnosti in impedančnimi razredi

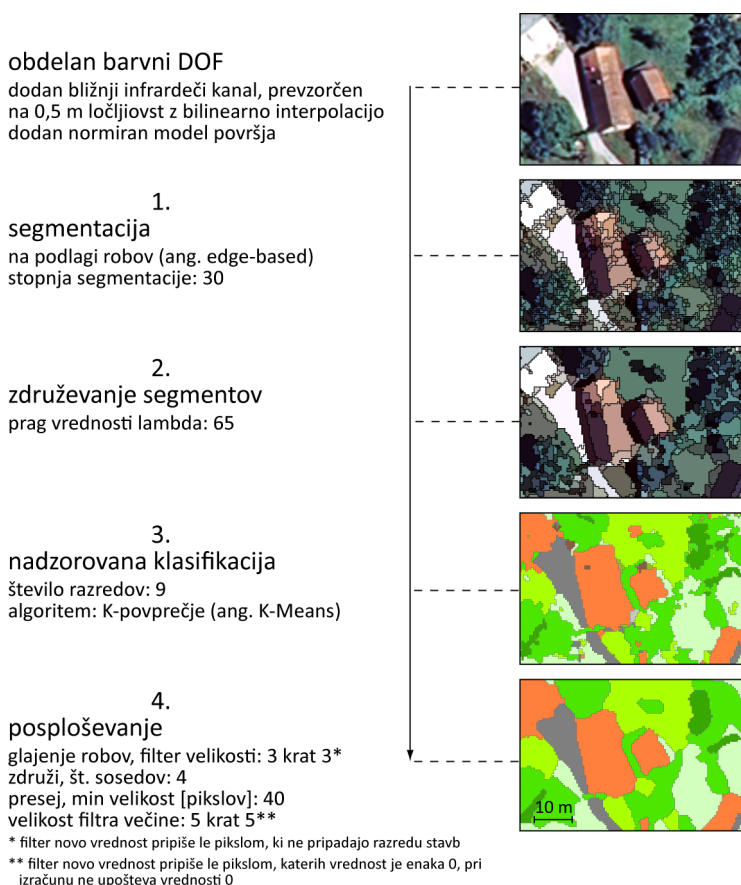
Študijsko območje pokriva šest barvnih posnetkov ortofoto prostorske ločljivosti 0,5 m, od katerih imata dva drugačen histogram od ostalih (drugačno razporeditev spektralnih vrednosti), kar bi pomenilo podvojeno označevanje vzorčnih območij za nadzorovano klasifikacijo. Odločil sem se za mozaičenje posnetkov in prilagoditev histograma (slika 59). Pri samodejni obdelavi podob običajno želimo obdržati spektralne vrednosti kar se da nespremenjene, saj je le tako mogoče zagotoviti optimalne pogoje obdelave. Da bi bile spremembe spektralnih vrednosti kar najmanjše, sem natančnost zapisa izhodne datoteke iz osem bitov spremenil v realna števila, ob čemer se je sicer povečala količina podatkov, vendar je natančnejši zapis nujen tudi zato, ker sem želel v obdelavo vključiti še normiran model površja in standardne odklone višin odbojev. Kot dodatni sloj sem v analizo zajel še bližnji infrardeči kanal letalskega snemanja z ločljivostjo 1 m, ki sem ga z bilinearno interpolacijo prevzorčil na ločljivost 0,5 m. Izvedel sem tri objektne klasifikacije: na podlagi DOF (modri, zeleni, rdeči in bližnji infrardeči kanal); DOF in nDMP; DOF, nDMP in standardnega odklona višin odbojev.



Slika 59: Izenačevanje histograma.

Figure 59: Histogram matching.

Razvrščal sem v devet kategorij, ki sem jih izbral glede na nadaljnje razvrščanje v impedančne razrede: stavbe, asfalt, makadam, železnica, travinje, obdelana zemljišča (njive), gola prst, listnat gozd, iglast gozd. Postopek klasifikacije prikazuje slika 60, kratko teoretično ozadje pa je opisano na strani 96. Karte pokrovnosti sem posploševal s prilagojenim filtrom večine na enak način, kot je opisan pri posploševanju za karto impedance, pridobljeno iz podatkov laserskega skeniranja (stran 99).

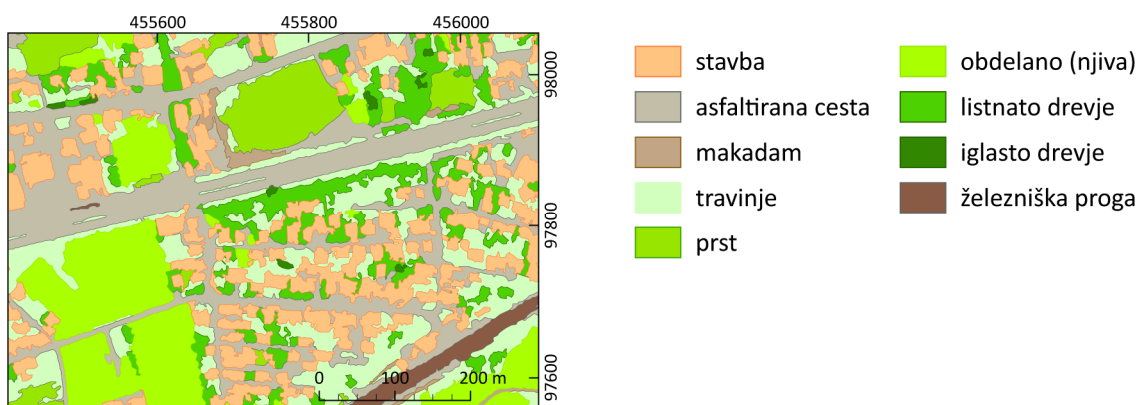


Slika 60: Postopek izdelave karte pokrovnosti z objektno klasifikacijo ortofoto posnetkov.

Figure 60: Object-based classification of aerial digital orthophotos.

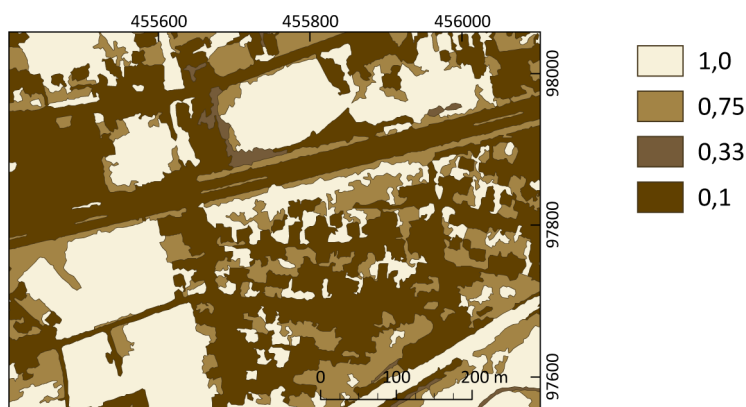
Iz statistične in vizualne primerjave klasifikacij sledi, da so kategorije, ki se najmanj spreminjajo (so torej najbolj stabilne), obdelana zemljišča, asfaltirane površine in stavbe. Največ težav je s klasifikacijo makadama, saj je večkrat razvrščen v kategorijo asfaltiranih površin in iglastega gozda, ki prehaja v listnati gozd. Vendar je iglastega gozda površinsko zelo malo in ima napačna klasifikacija zato velik relativen vpliv. Pri klasifikaciji posnetkov pasivnih letalskih in satelitskih senzorjev so velika nadlega sence, saj spreminjajo spektralne podpise objektov, kar otežuje ali celo onemogoča interpretacijo (Baltsavias 2004; Oštir 2006, 121; Duro et al. 2007, 250). Obstajajo številne metode za njihovo samodejno zaznavanje in odstranitev (na primer Richter in Müller 2005; Veljanovski 2007, 44-49; Arevalo et al. 2008), tudi njihovo klasifikacijo kot posebno kategorijo in nadomeščanje s klasifikacijo podatkov aktivnih senzorjev (Švab Lenarčič 2009, 92-93). Njihova izvedba je za potrebe te naloge nebitvena, zato so bile sence na številnih mestih napačno klasificirane v kategoriji stavb ali iglastega gozda, česar se ni dalo odpraviti niti z dodanima slojema nDMP in standardnih odklonov višin odbojev (primer prikazuje slika 60). V celoti je najbolj natančna klasifikacija na podlagi DOF in nDMP (slika 61), zato sem jo preko impedančnih razredov pretvoril v karto z impedančnim koeficientom G (slika 62) in to uporabil v nadaljnjih analizah.

Podobno kot pri klasifikaciji posnetkov Landsat, je z ustrezno poobdelavo možno izboljšati tudi natančnost karte pokrovnosti, izdelane z objektno klasifikacijo ortofoto posnetkov. Ming-Jer et al. (2008) so izdelali študijo natančnosti različnih pristopov klasifikacij ortofoto posnetkov in podatkov ZLS ter njihovih kombinacij za urbana območja. Avtorji so najkakovostnejši rezultat dosegli s t.i. sistemom popravkov, ki temelji na odločitvenem drevesu (angl. knowledge-based correction system) in s podatki kanalov vidne svetlobe ortofoto posnetkov in nDMP laserskega skeniranja. Iz vhodnih podatkov so na podlagi karakterističnih modelov in predhodnega znanja operaterja izdelali bazo pravil za tri višinske razrede in s temi pravili v obliki odločitvenega drevesa izvedli klasifikacijo v štiri razrede (stavbe, ceste, trava in drevje) ter na način dosegli skupno tematsko natančnost domala 94 %.



Slika 61: Izsek karte pokrovnosti, izdelane z objektno klasifikacijo letalskih ortofoto posnetkov.

Figure 61: A part of the land cover map produced by object-based classification of aerial orthophotos.



Slika 62: Izsek karte akustične impedance izdelane z objektno klasifikacijo letalskih ortofoto posnetkov in izražene z impedančnim koeficientom G.

Figure 62: The equivalent G factor acoustic impedance map created with a classification of aerial orthophotos.

Preglednica 22: Kategorije, ki jih lahko upoštevamo pri klasifikaciji ortofoto posnetkov z namenom izdelave karte akustične impedance.

Table 22: Orthophoto classification categories.

impedančni razred	opis
B	listnati gozd, ledenik in stalni sneg
C	iglasti ali mešani gozd, prehod med grmičevjem in gozdom, pogorišče
D	kmetijsko zemljišče, naravno travnišče, vresišče in ruševje, plaže, peščene sipine in ravnine
E	železnica, urejena poraščena zemljišča, urbano zeleno območje, športno ali rekreacijsko območje, gozd z vidnim skalovjem, zemljišče z redkim rastjem, barje ali šotišče
F	makadam, rudnik, odlagališče odpadkov, gradbišče, skalovje in prodišče, močvirje ali barje s stoječo vodo, slanovodno mokrišče
G	gosto pozidana bivalna območja, cestišča, parkirišča, industrija, trgovina, javne storitve in vojaški objekti, pristanišče, voda

#### 4.7.4. Karta dejanske rabe zemljišč MKGP

Zelo primeren vir podatkov o rabi tal v Sloveniji je izdelana karta dejanske rabe zemljišč.

##### uporabljeni podatki

- karta dejanske rabe zemljišč (MKGP)

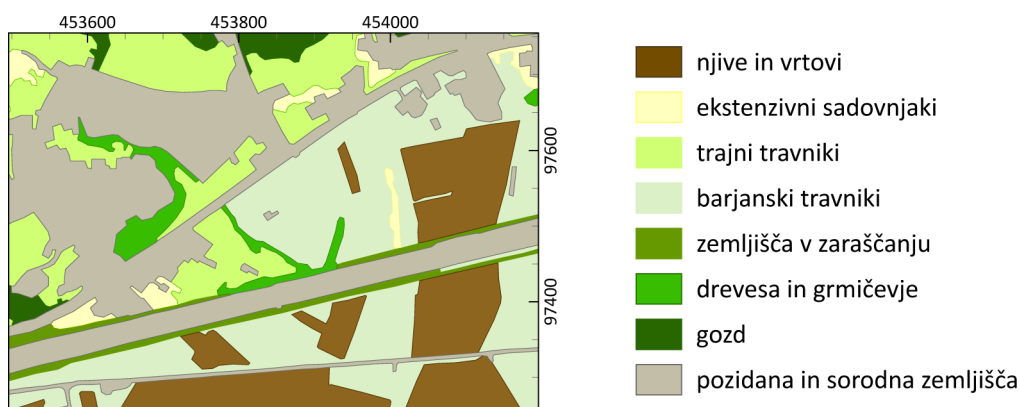
##### izvedba

- posploševanje  
- določitev povezave med razredi pokrovnosti in impedančnimi razredi

Karta Dejanske rabe zemljišč (2008), izdelana na Ministrstvu Republike Slovenije za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano (MKGP), velja za položajno in atributno najbolj natančen podatek o rabi kmetijskih zemljišč za ozemlje celotne države (slika 63). Karta na drugi ravni loči 21 razredov, na prvi pa kmetijska zemljišča, gozdna in ostala poraščena zemljišča, pozidana in sorodna zemljišča, odprta zamočvirjena zemljišča, suha odprta zemljišča s posebnim rastlinskim pokrovom, odprta zemljišča brez nepomembnega rastlinskega pokrova ali z njim in vode. Razredi so določeni na osnovi vnaprej dogovorjenih pravil in razmejeni na podlagi vizualne interpretacije digitalnih posnetkov ortofoto v merilu 1 : 5000. Prometna (ceste, železnice in podobno) in vodna infrastruktura (na primer tekoče vode, vodni kanali) je zajeta, če njena širina presega 2 m, v nasprotnem primeru je ob upoštevanju prioritete tabele pripisana sosednjemu poligonu. Pravilnik določa, da je najmanjša površina zajema za vodo 10 m<sup>2</sup>, za pozidana in sorodna zemljišča pa 25 m<sup>2</sup>. Za kategorije kmetijskih zemljišč znašajo predpisane najmanjše površine od 25 m<sup>2</sup> (rastlinjak), preko 500 m<sup>2</sup> (hmeljišče, vinograd, oljčnik in ostali trajni nasadi) in 1000 m<sup>2</sup> (vse ostale kategorije kmetijskih zemljišč) do 5000 m<sup>2</sup> (kmetijska zemljišča znotraj pozidanih površin in gozda ter ostala nekmetijska zemljišča). Za projekt izdelave rabe tal takšne ali podobne kakovosti za večje območje (na primer celotno državno ozemlje) je potrebno izjemno veliko finančnih sredstev in vloženega dela (Boštjančič Čuš 2006; Kokalj et al. 2006, 86).

Karta je zaradi svoje razčlenjenosti zelo primerna za pretvorbo v karto impedance zlasti pri razredih z večjim uporom na širjenje zvoka. Njena najpomembnejša pomanjkljivost je nerazčlenjenost kategorije pozidanih in sorodnih zemljišč, zlasti neizločenost cest in stavb (slednje sicer lahko pripišemo iz katastra stavb), saj imajo lahko bistveno drugačno impedanco od okolice, na primer travnikov in parkov. Kategorija je zelo pomembna, saj naj bi ponujala tako (posredne) podatke o impedanci vira, kot zemljišč v bližini

najpomembnejših sprejemnikov (ob stavbah). Po interpretacijskem ključu (Boštjančič Čuš 2006, 55, 72-85) v ta razred sodijo vsa zemljišča, na katerih so zgradbe, ceste, ki vodijo do naselij ali hiš, parkirni prostori, rudniki, kamnolomi in druga infrastruktura, ki služi za opravljanje človeških dejavnosti. Vsebuje tudi določene tipe odprtih zemljišč kot so na primer funkcionalna zemljišča zgradb, odlagališča industrijskih in gospodinjskih odpadkov, zapuščena zemljišča znotraj pozidanih območij, mestni parki, vrtovi in druga rekreacijska območja (igrišč za golf, nogometna igrišča in podobno) ter kuhinjski vrtovi in ekstenzivni sadovnjaki, ki obdajajo stavbe, če so manjši od predpisane najmanjše površine. V razred so všteti še s travo oziroma drevjem ali grmovjem zasajeni pasovi ob avtocesti, znotraj zaščitne ograje. Zaradi nerazčlenjenosti je treba vsem naštetim tipom rabe, pripisati impedanco, kot da bi bila zemljišča pozidana, torej razred z najmanjšo upornostjo (G), kar je sicer v prid tezi o napakah, ki so na strani večjega varstva pred hrupom.



Slika 63: Izsek iz karte dejanske rabe zemljišč MKGP. Na sliki je enako območje kot ga prikazuje slika 55. V legendi so prikazane le kategorije, ki se jih da razbrati s tega dela karte.

Figure 63: A part of the Actual land use of agricultural and forest land map. The image represents the same area as figure 55. Only visible categories are represented in the legend.

Karti dejanske rabe zemljišč MKGP je treba pred uporabo v programu za računanje širjenja zvoka dodati obrise zgradb, ki so uporabljene v izračunih, jo pretvoriti v karto zvočne impedance in, čeprav je bila v veliki meri poenostavljena že ob sami interpretaciji (Boštjančič Čuš 2006, 72-85), dodatno posplošiti. Ključ za pretvorbo kategorij rabe tal v impedančne razrede (preglednica 23) sem izdelal na podlagi priporočil in meritev, ki jih podajajo Sohlman et al. (2004), Kragh et al. (2006) in metoda za ugotavljanje akustične impedance Nordtest (NT ACOU 104 1999).

Preglednica 23: Pretvorba kategorij rabe tal karte Dejanske rabe zemljišč MKGP v razrede zvočne impedance.

Table 23: Translation of Actual land use of agricultural and forest land map to impedance classes.

raba ID	opis	impedančni razred
1100	njive in vrtovi	D
1130	začasni travniki	D
1160	hmeljišča	D
1180	trajne rastline na njivskih površinah	D
1190	rastlinjaki	G
1211	vinogradi	E
1212	matičnjaki	E
1221	intenzivni sadovnjaki	E
1222	ekstenzivni sadovnjaki	D
1230	oljčni nasadi	E
1240	ostali trajni nasadi	D
1300	trajni travniki	C
1321	barjanski travniki	D
1330	gorski pašniki	D
1410	zemljišča v zaraščanju	C
1420	plantaže gozdnega drevja	E
1500	drevesa in grmičevje	C
1600	neobdelana kmetijska zemljišča	D
1800	kmetijske površine porasle z gozdnim drevjem	D
2000	gozd	C
3000	pozidana in sorodna zemljišča	G
4100	barje	E
4210	trstičja	E
4220	ostala zamočvirjena zemljišča	F
5000	suha odprta zemljišča s posebnim rastlinskim pokrovom	E
6000	odprta zemljišča brez ali z nepomembnim rastlinskim pokrovom	F
7000	vode	G

Vinogradi, matičnjaki, intenzivni sadovnjaki, oljčni nasadi in plantaže gozdnega drevja so zaradi vključenih poti in dobršne zbitosti tal uvrščeni v višji impedančni razred, kot ocenjujejo Kragh et al. (2006, 23) ter Chiari et al. (2007, 37-38). Pri kategoriji trajnih travnikov so za širjenje zvoka pomembne izjeme, kot so na primer športna letališča, igrišča za golf in smučišča. Značilen je velik razpon možnih vrednosti pri barjih (med C in F, privzeto E) glede na prisotnost stoječe vode.

Za *posploševanje (generalizacijo, poenostavljanje) linij in poligonov* je v GIS in kartografiji najpogosteje uporabljen algoritem, ki sta ga osnovala Douglas in Peucker (1973) in o



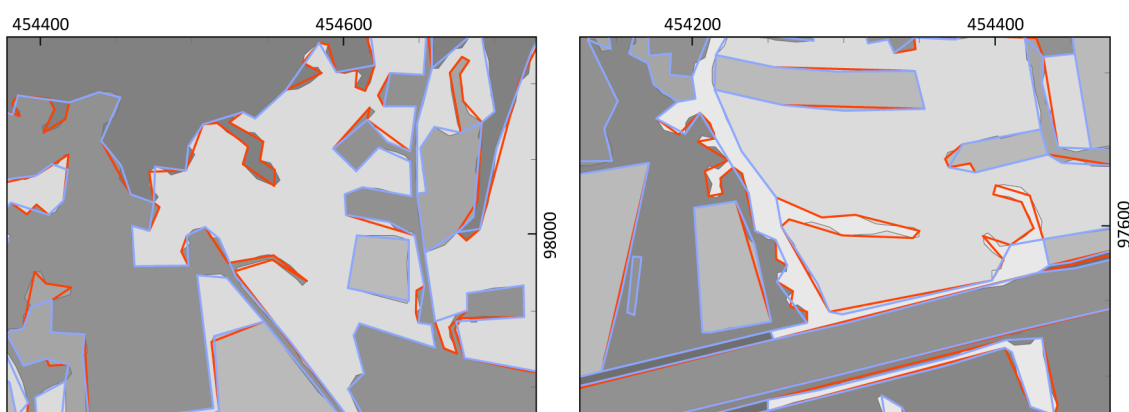
katerem sem že govoril. Je enostaven in pripraven zlasti za hitro zmanjševanje števila odvečnih točk pri majhnih tolerančnih vrednostih. Obdrži kritične točke, ki ponazarjajo osnovno obliko in odstrani ostale. Deluje tako, da poveže končne točke linije z linijo trenda, izmeri razdaljo vsake točke do tega trenda in odstrani točke, ki so bližje od uporabniško določene tolerance. Nato linijo razdeli v točki, ki je najdlje od linije trenda in tako dobi novi liniji trendov. Razdalje preostalih točk primerja z novima linijama in postopek ponavlja, dokler niso odstranjene vse točke, ki so linijam trenda bližje od določene tolerance. Ena izmed slabosti algoritma je nagnjenost k ohranitvi štrlečih oblik in vnosu koničastih oblik, rezultat pa je pri velikih tolerančnih vrednostih lahko tudi preveč oglat (Bloch et al. 2006, 6).

Algoritem, ki sta ga zasnovala Wang in Muller (1998), temelji na prepoznavanju oblik in odkriva krivulje v linijah, jih analizira in odstrani nepomembne. Algoritem je iterativen in deluje tako, da različne geometrijske lastnosti krivulj primerja z lastnostmi referenčnega polkroga, katerega polmer pomeni uporabniško določeno tolerančno vrednost. Izločene krivulje nadomesti z njihovo osnovno linijo (linijo, ki povezuje končni točki krivulje). Izhajajoča linija bolj zvesto sledi originalni in je boljše kartografske kakovosti, kot pri algoritmu Douglas-Peucker. Omenjena algoritma sta v ESRI ArcGIS okolju poznana kot »point remove« in »bend simplify« (ESRI Help 1 2008).

Visvalingham in Herbert (1999), ki sta izdelala študijo in primerjavo algoritmov za posploševanje linij, navajata, da je Wang-Mullerjev algoritem, kljub nadgradnji iz delovanja na triangularnih objektih v prepoznavanje konkavnih in konveksnih zavojev, manj primeren za posploševanje linij. Bloch in Harrower (2006) sta v svojem programskem orodju MapShaper (Harrower et al. 2006) kot dopolnitev Douglas-Peuckerjevega algoritma zato izbrala algoritem Visvalingham-Whyatt in njegovo nadgradnjo, algoritem Weighted Visvalingham-Whyatt. V nasprotju s prvim, slednja za obravnavo učinkov brisanja točk uporabljata odklon površine območja, ki ga tvorijo točka in njena soseda na liniji. Posploševanje je iterativen proces, sestavljen iz odstranjevanja točk z najmanjšo povezano spremembo površine, preračunom povezanih površin in ponovitve odstranjevanja dokler ni dosežena zahtevana stopnja posplošitve. Pri enako velikih območjih, prilagojeni algoritem prioriteto izloči trikotnike z bolj ostrimi koti, kar ima za posledico bolj zglajene linije.

Iz vizualne primerjave rezultatov posploševanja lahko razberemo, da je za posploševanje poligonov rabe tal ob enakih tolerančnih vrednostih najprimerneje uporabiti algoritem

Weighted Visvalingham-Whyatt (slika 64). Poligonom namreč odstrani odvečna vozlišča, ne vnaša koničastih oblik in hkrati izloči ozke in dolge »izrastke«. Obdrži tudi bolj točno ponazoritev dolgih segmentov, kar je pomembno pri cestah. Vendar proces posploševanja lahko vnese topološke napake, na primer presečišča linij, podvojene linije in linije z nično dolžino, ki jih prosto dostopna različica algoritma Weighted Visvalingham-Whyatt ne zna odpraviti. Orodje tudi ne omogoča metričnega vnašanja tolerančnih vrednosti temveč le drsnik »bolj-manj«. Zato sem se odločil za drugačen pristop. Za posploševanje sem uporabil kombinacijo operacij združevanja (dissolve), spajanja (aggregate), odstranjevanja manjših poligonov ter posploševanja z algoritmom Wang-Muller (slika 65). Slednji je v okolju ArcGIS opremljen z iterativno metodo, ki odkriva vnesene topološke napake in težavna mesta ponovno posploši s prepolovljeno toleranco. Kot rezultat so prisotna območja z različno stopnjo posplošitve, saj nekatere točke zaradi posledičnega vnosa presečišč ne morejo biti odstranjene (Lee et al. 2005, 6).

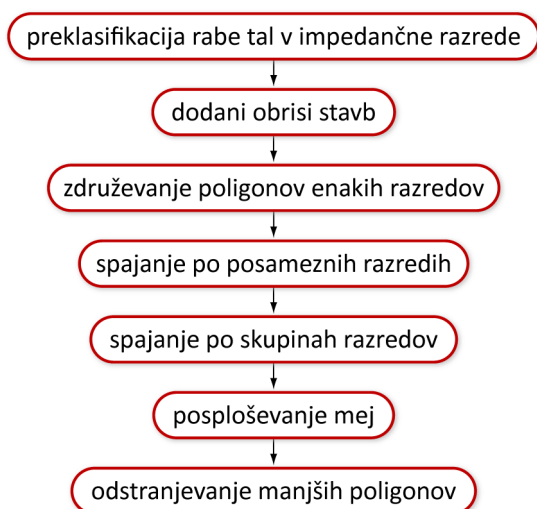


Slika 64: Vizualna primerjava algoritmov za posploševanje poligonov – izseka testnega območja. Prvotna karta dejanskih zemljišč MKGP je prikazana v sivinski lestvici, robovi so označeni temno sivo. Posplošitev z algoritmom Douglas-Peucker je prikazana oranžno, z algoritmom Weighted Visvalingham-Whyatt pa modro.

Figure 64: Visual comparison of polygon generalization algorithms – a test area subset. Original Actual land use of agricultural and forest land map is represented in greyscale, generalization with Douglas-Peucker algorithm in orange and Weighted Visvalingham-Whyatt algorithm in blue.

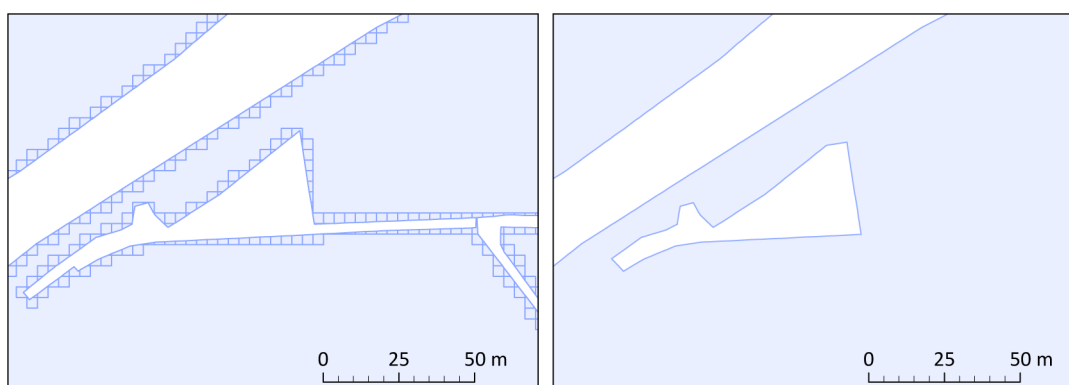
Slika 67 prikazuje različne korake posploševanja impedančne karte, izdelane iz karte dejanske rabe zemljišč MKGP. Preklasificiranim kategorijam sem dodal ročno popravljene poligone stavb, označene z impedančnim razredom G. Ta impedančni razred sem sprva spojil z razdaljo med poligoni 15 m, pri čemer sem ohranil vse poligone kategorije G in odstranil v njih vsebovana območja manjša od 100 m<sup>2</sup>. Algoritem v okolju ArcGIS deluje tako, da ne spoji mej poligona ali različnih delov istega poligona, kar pomeni, da ne odstrani

»zajed in izrastkov« istega poligona, razdaljo pa določa le na podlagi razdalje med posameznimi vozlišči. Omenjeni lastnosti sta bili v prvem koraku koristni, saj zagotavljata najmanjše spremembe zunanjih mej kategorije (slika 67 A in C), vendar omejujoči v naslednjih korakih, v katerih sem želel odstraniti poligone ožje od 5 m (večinoma ceste, poti in obcestne zelenice). Omejitev sem obšel z razdelitvijo večdelnih poligonov ter z oblikovanjem kvadratne mreže velikosti 3,5 m (manjše od  $5\text{ m} / \sqrt{2}$ ) s katero sem razdelil robove poligonov (slika 66) in tako dobil za spajanje primerno oddaljena vozlišča.



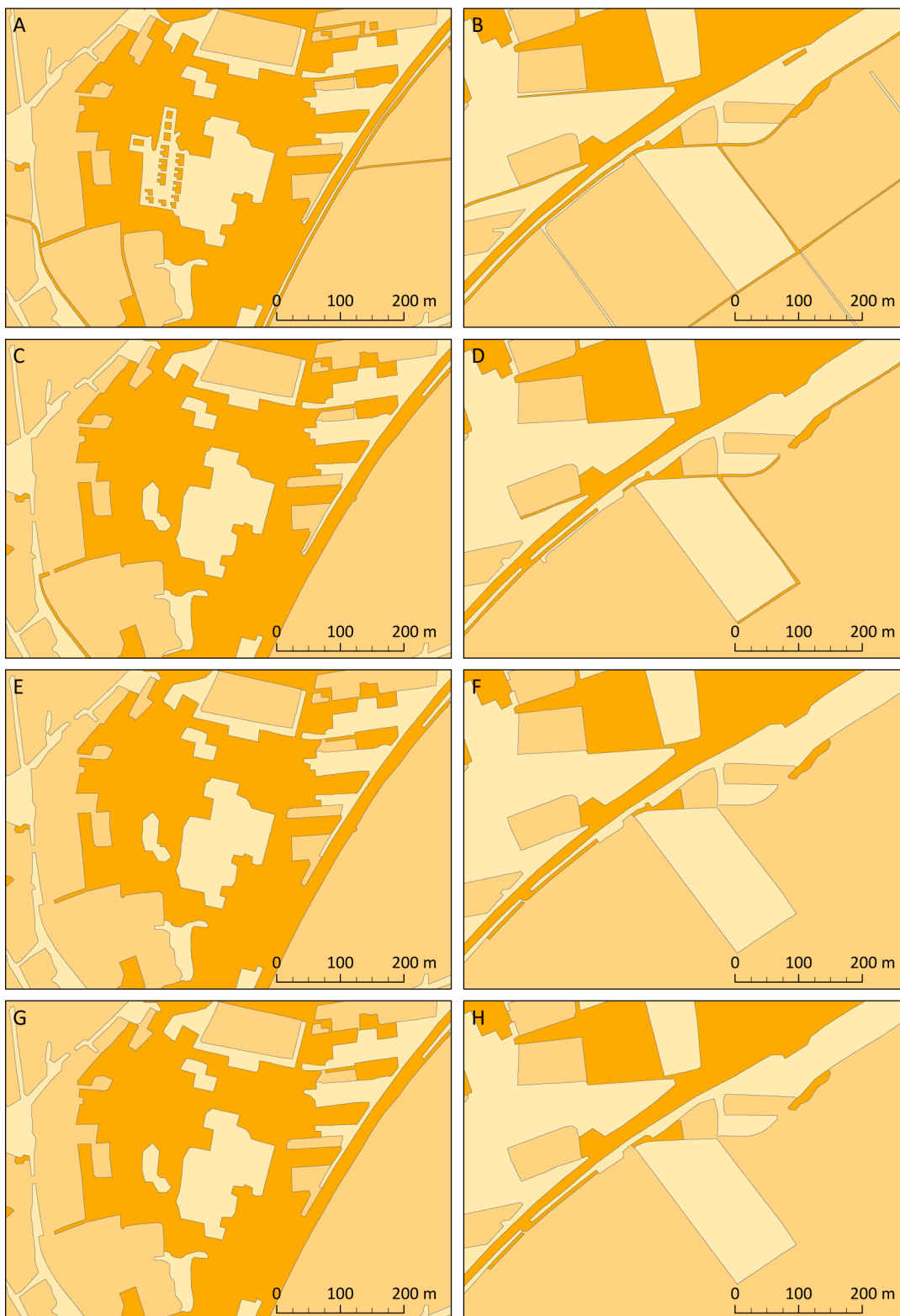
Slika 65: Postopek posploševanja karte dejanske rabe zemljišč MKGP v karto akustične impedanace.

Figure 65: Generalization of the Actual land use of agricultural and forest land map into an acoustical impedance map.



Slika 66: Deli poligonov, ožji od 5 m, so bili odstranjeni s spajanjem (desno), pri čemer je bilo treba, zaradi načina delovanja algoritma, zagotoviti vozlišča, ki so po diagonali bližje kot 5 m. To sem storil z razdelitvijo robov poligonov s 3,5 m mrežo.

Figure 66: Polygon parts narrower than 5 m were removed by aggregation (right plate). This was done by first dividing the edges of polygons with a 3.5 m grid that ensured all the necessary vertices to be less than 5 m apart (left plate).



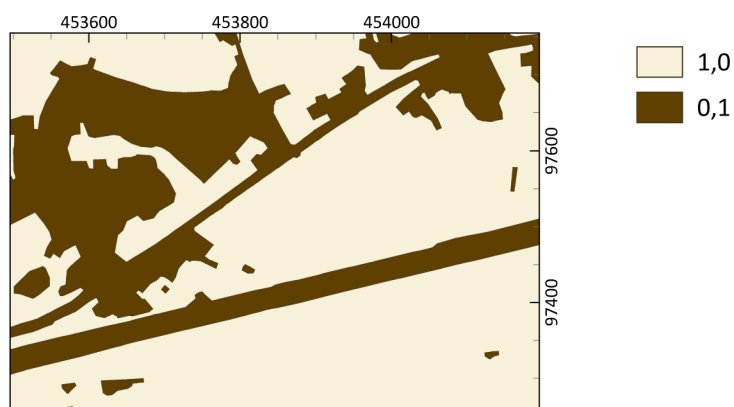
Slika 67: Izseka karte akustične impedance izdelane iz karte dejanske rabe zemljišč MKGP v različnih korakih posploševanja. Levi stolpec prikazuje območje pozidave, desni pa pretežno kmetijska zemljišča z vmesnimi potmi (tanjšimi poligoni). V prvem koraku posploševanja so bile kategorije rabe tal preklasificirane v impedančne kategorije; kategoriji G so bile dodane stavbe (A, B). V drugem in tretjem koraku je bilo izvedeno

iterativno spajanje in odstranjevanje delov poligonov z manj kot 5 m širino, najprej znotraj ene kategorije (C, D), nato še med več kategorijami (E, F). V zadnjem koraku je sledilo posploševanje z algoritmom Wang-Muller (G, H).

Figure 67: Two parts of the acoustic impedance map created from the Actual land use of agricultural and forest land map in different stages of generalization. The left column of plates represents a predominantly build up area, the right mostly agricultural land with intermediate roads and track (narrow polygons). The first stage of simplification included reclassification of the land use map into impedance classes; buildings were added to the category G (plates A and B). Aggregation of polygons and elimination of the ones less than 5 m wide were done iteratively in the second and third stages, first within each separate category (plates C and D), then within more categories at once (plates E and F). Generalization with Wang-Muller algorithm was done in the last stage followed by a repeated addition of buildings (plates G and H).

Da bi bile spremembe meja kar najmanjše, karta impedance pa primerna za oceno širjenja zvoka po načelu zagotavljanja večjega varstva pred hrupom, sem kopicil razrede iterativno po vrstnem redu od najugodnejšega za širjenje zvoka do najmanj ugodnega; torej od G navzdol. Sprva sem odstranil ožine znotraj enega razreda (slika 67 C in D), nato pa še v kombinaciji večih razredov. Na ta način sem odstranil tudi več vzporednih ožjih pasov različnih razredov, katerih skupna širina presega 5 m, in ožje pasove, ki ležijo med razredoma z različno impedanco (slika 67 F). Na koncu sem poligone posplošil z algoritmom Wang-Muller (dolžina referenčne krivulje 15 m) (slika 67 G in H).

Za potrebe računanja jakosti zvoka po metodi NMPB sem impedančno karto pretvoril v razrede impedančnega koeficienta G (preglednica 15, slika 68).



Slika 68: Izsek karte akustične impedance izdelane iz karte dejanske rabe zemljišč MKGP in izražene z impedančnim koeficientom G.

Figure 68: The equivalent G factor acoustic impedance map created from the Actual land use of agricultural and forest land map.

#### 4.7.5. Karta pokrovnosti Corine

Sohlman et al. (2004) so z terenskimi merjenji zvočne impedance tal povezali njene vrednosti z nekaterimi kategorijami baze Corine.

uporabljeni podatki

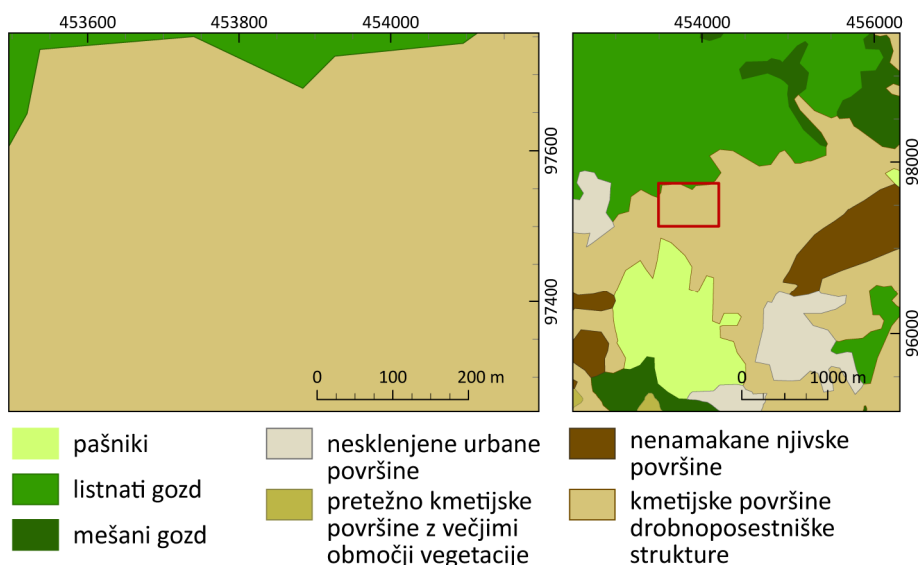
- raba tal/pokrovnosti Corine

izvedba

- določitev povezave med razredi pokrovnosti in impedančnimi razredi

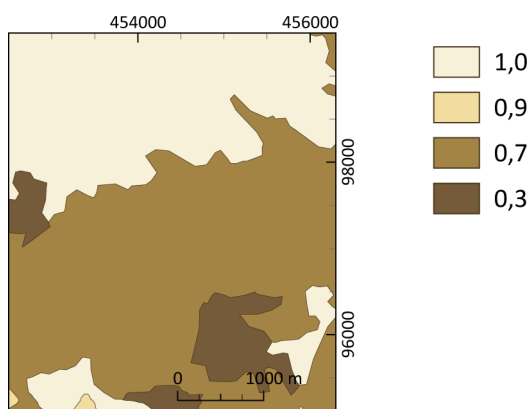
Posebne odlike slojev pokrovnosti Corine so zelo natančno določena metodologija in razdelitev kategorij na tri ravni ter časovna in prostorska primerljivost na evropski ravni. Tretja, najpodrobnejša raven, vsebuje 44 kategorij, od katerih jih je v Sloveniji ugotovljenih 37. Sloj pokrovnosti je pridobljen z vizualno interpretacijo ortorektificiranih satelitskih posnetkov v merilu 1 : 100.000 (Landsat TM (CLC95) in ETM+ (CLC2000) ter SPOT 5 in IRS P6 (CLC2006)). Dopolnilni viri so sektorske baze podatkov, topografske karte in predvsem letalski posnetki (Evropska okoljska agencija 2007). Pomembnejši pomanjkljivosti sta najmanjša velikost kartiranih območij (v Sloveniji 20 ha, drugod 25 ha (Hočevar et al. 2001, 359)) in najmanjša širina poligona (100 m), ki se odražata v mešanih kategorijah in v veliki meri izpuščenih oblikah (na primer reke in avtoceste). Kritike podatkovnega sloja v Sloveniji letijo zlasti na neprimernost uporabe za krajevne in regionalne študije ter delno uporabnost na državni ravni (Petek et al. 2004, 17).

Pri preklasifikaciji kategorij pokrovnosti Corine sem se oprl na prirejeno strukturo Chiari et al. (2007), ki sta jo za potrebe izdelave strateške karte hrupa mestne občine Ljubljana podrobneje razdelala Globevnik in Štimac (2008, 24) (slika 70). Tako izdelana karta je mnogo bolj posplošena, zaradi pogojev zajema pa je pomanjkljiva zlasti velika odsotnost območij kategorij, ki so pri računanju karte ravni zvoka najbolj zanimive, to je območij bivanja in večjih prometnic (slika 69). Zaradi velike posplošenosti tudi niso zajeti ožji drevesi pasovi, zaradi česar lahko pride do večjih napak pri računanju jakosti zvoka, v primeru, ko je to upoštevano, saj je na primer Dietrich (2003) izračunal, da je neposredno zmanjšanje hrupa 50 m pasu dreves v vetrovnih pogojih kar 6 dB neposredno in 1 dB posredno, zaradi zmanjšanja hitrosti vetra.



Slika 69: Izsek iz karte pokrovnosti Corine. Na sliki levo je enako območje kot ga prikazuje Slika 55, na sliki desno je prikazano celotno študijsko območje. V legendi so prikazane le kategorije, ki se jih da razbrati s tega dela karte.

Figure 69: A part of the Corine land cover map. The left plate represents the same area as Figure 55 while the right plate shows the whole study area. Only visible categories are represented in the legend.



Slika 70: Karta akustične impedance izdelana iz karte pokrovnosti Corine in izražena z impedančnim koeficientom G.

Figure 70: The equivalent G factor acoustic impedance map created from the Corine land cover map.

#### 4.7.6. Povzetek izdelave impedančnih kart iz podatkov daljinskega zaznavanja

Zvočna impedanca tal je podatek, ki se zaradi neobstojećih prostorskih informacij v kartiranju ravni zvoka največkrat upošteva le v najosnovnejši obliki (akustično »mehke« in »trde« površine). Zato sem na podlagi študij, ki ugotavljajo povezave med zvočno

impedanco tal in tipičnimi kategorijami pokrovnosti oziroma rabe tal, izdelal impedančne karte, primerne za uporabo tako po računski metodi Harmonoise kot francoski NMPB. Izdelane impedančne karte se razlikujejo po naboru vhodnih podatkov in metodah njihove obdelave. V literaturi ni zaslediti, da bi bile opravljene raziskave na ta način, tako poglobljeno in s tovrstnimi podatki.

Preglednica 24: Smiselnost uporabe daljinskega zaznavanja za izdelavo kart pokrovnosti, ki jih lahko prevedemo v karte zvočne impedančne.

Table 24: Applicability of remote sensing for producing land cover maps that can be transformed into maps of acoustic impedance.

	časovna natančnost	položajna natančnost	tematska natančnost*	zmožnosti posodabljanja	strošek
letalska fotografija					
vizualna fotointerpretacija	■	■	■	■	■
objektna klasifikacija	■	■	■	■	■
visokoločljivi sateliti					
vizualna fotointerpretacija	■	■	■	■	■
objektna klasifikacija	■	■	■	■	■
srednjeločljivi sateliti					
vizualna fotointerpretacija	■	■	■	■	■
pikselska klasifikacija	■	■	■	■	■
zračno lasersko skeniranje					
samodejna obdelava	■	■	■	■	■
ustreznost	velika	srednja	majhna		
	■	■	■		

\* izdelane karte pokrovnosti oziroma interpretirane rabe tal

Uporabil sem samodejno klasifikacijo podatkov laserskega skeniranja, pikselsko klasifikacijo posnetkov satelitskega sistema Landsat, objektno klasifikacijo letalskih ortofoto posnetkov ter že obstoječi bazi Dejanska raba zemljišč in Corine, izdelani z ročno fotointerpretacijo letalskih ortofoto podob oziroma podob sistema Landsat. Izbor najprimernejše metode mora temeljiti na kriteriju natančnosti modeliranja ravni zvoka in velikosti regije, ki jo proučujemo. Obstoječa Karta dejanske rabe zemljišč nudi izvrsten vir, ko želimo ovrednotiti območja varstva pred hrupom in uporabiti že obstoječ (interpretiran) vir. Če želimo tematsko bolj točne podatke znotraj pozidanih območij, je za krajevne in regionalne študije primernejši vir objektna klasifikacija letalskih posnetkov ali podob visokoločljivih satelitov, za študije zelo velikih regij ali držav pa nadzorovana pikselska



klasifikacija srednjeločljivih satelitskih posnetkov. Karta pokrovnosti izdelana izključno iz podatkov laserskega skeniranja ne dosega zadovoljive tematske natančnosti. Za zelo težavno se je izkazalo zlasti določevanje odstavnih pasov, saj imajo bistveno drugačne odbojne lastnosti od voznih, hkrati pa se ne ločijo dovolj od drugih kategorij. Baza Corine je primerna le za območja, kjer drugi podatki o pokrovnosti niso na voljo. Njena prostorska razčlenitev je namreč v pokrajinsko zelo pestri Sloveniji, kjer se raba tal spreminja na zelo kratke razdalje, presplošna. Okrnjene so zlasti tiste kategorije, ki so za širjenje zvoka najbolj zanimive.

Pomembna komponenta, ki jo je potrebno pri izdelavi impedančnih kart upoštevati in pri kateri imajo satelitski senzorji prednost pred ostalimi načini zajema prostorskih podatkov, je njena časovna spremenljivost, na primer zaradi modeliranja snežne odeje in stanja rastja. Zahtevni izračuni ravni zvoka zaenkrat sicer ne omogočajo upoštevanja časovne spremenljivosti parametrov, na primer prostorsko in časovno izražene statistične porazdelitve vrednosti, ki označujejo akustične lastnosti tal, vendar lahko z napredkom računalniške strojne opreme tovrstne izračune pričakujemo, zato bodo takrat metode in viri podatkov, kakršno je daljinsko zaznavanje, bolj v ospredju.

Posamezne izdelane impedančne karte so z vidika vpliva na širjenje zvoka ovrednotene v poglavju 5.2.

## 4.8 Podnebni podatki

Pri izračunu višine ravni zvoka za mesečno časovno serijo sem želel upoštevati tudi podnebne podatke, saj so poleg prometnih podatkov in vrednosti impedance, edini spremenljivi preko leta.

Računanje ravni zvoka za celotno letno časovno serijo v praksi običajno ni mogoče, zato je smiselno omejiti izračune na razmeroma majhno število primerov, ki so reprezentativni za bistvena meteorološka stanja. Ta stanja lahko združimo v kategorije (meteorološke razrede). Letno (mesečno, urno) povprečno raven zvoka nato izračunamo iz obteženega povprečja rezultatov za razrede. Uteži so frekvence pojavljanja meteoroloških stanj, ki ustrezajo posameznemu razredu, porazdelitev frekvenc pa je odvisna od krajevnega podnebja. Metoda

je bila konec 60. let razvita za potrebe napovedovanja dolgoročnih povprečnih koncentracij onesnaževalcev v zraku in 20 let kasneje prirejena za ocenjevanje dolgoročnih ravni hrupa (Heimann in Salomons 2004, 938). Renterghem in Botteldooren (2007, 1) navajata, da je razlika med izračunanimi letnimi vrednostmi ravni zvoka iz povprečnih letnih meteoroloških podatkov in vrednostmi ravni zvoka izračunanih iz urnih meteoroloških podatkov, ki so bili na koncu povprečeni, zanemarljiva.

Pri metodi NMPB se raven zvoka pri nevtralnih atmosferskih pogojih za širjenje zvoka izračuna za vsak oktavni pas<sup>18</sup> za vsako pot med točkovnim virom in sprejemnikom z enačbo

$$L = L_W - A_{div} - A_{atm} - A_{tla,H} - A_{ukl,H} , \quad (12)$$

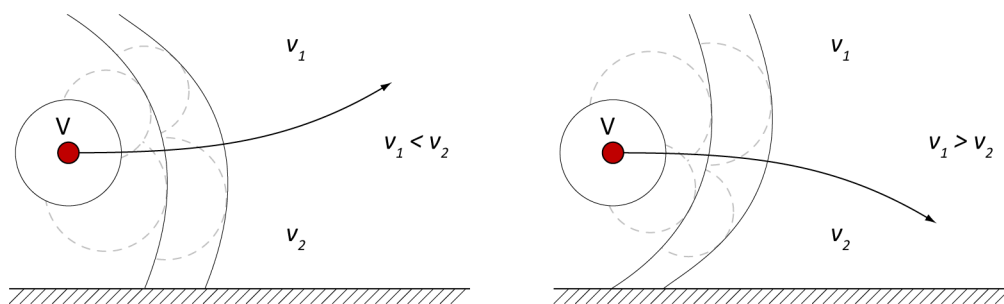
kjer so  $L_W$  raven zvočne moči vira (v dB(A)),  $A_{div}$  zmanjšanje zaradi geometrične divergence,  $A_{atm}$  zmanjšanje zaradi atmosferske absorpcije,  $A_{tla,H}$  zmanjšanje zaradi učinka tal pri homogenih pogojih in  $A_{ukl,H}$  zmanjšanje zaradi difrakcije pri homogenih pogojih. Enako velja za izračun pri pogojih, ugodnih za širjenje zvoka (Wölfel et al. 2003a, 4-6).

Homogeni atmosferski pogoji so pogoji, za katere je hitrost širjenja zvočnih valov upoštevana kot stalna v vse smeri in v vsako točko prostora širjenja. Pri tem so zvočni žarki premočrtni. Ker je atmosfera običajno navpično razslojena (nehomogena) zaradi vpliva vetra in spreminjajoče se temperature, z naraščanjem višine naraščajo ali padajo tudi hitrosti zvoka. Poleg nehomogenosti atmosfere ima na smer širjenja zvoka vpliv tudi smer vetra. Ob prisotnosti navpičnega gradienta hitrosti zvoka se zvočni valovi uklonijo v smeri od visokih hitrosti, proti nizkim. Glede na trenutne razmere se valovanje ukloni bodisi navzgor ali navzdol (slika 71). Ko hitrost zvoka pada z višino, se smer zvočnega valovanja uklanja navzgor, stran od tal. Za tipične hitrosti zvoka obstaja mejni »žarek«, ki oplazi tla. Nad tem žarkom je zvočno polje, sestavljeno iz neposrednih in od tal odbitih zvočnih valov, medtem ko je pod mejnim žarkom zvočna (akustična) senca, kjer zvočno valovanje v teoriji ne obstaja. V naravi nekaj zvočne energije vseeno prehaja v zvočno senco, zato je v praksi

---

<sup>18</sup> Oktava je interval med dvema tonoma s polovično ali dvojno frekvenco. Oktavni pasovi (intervalni razredi) so torej frekvenčni razredi zvočnega valovanja. Pri računanju zvoka se običajno uporabljajo celi (na primer metoda NMPB) ali tretjinski (na primer metoda Harmonoise) oktavni pasovi, na primer 125, 250, 500, 1000 Hz, itd. oziroma 25, 31,5, 40, 50 Hz, itd.

zmanjšanje ravni zvoka omejeno na 15 do 20 dB. Uklon akustične poti navzdol se običajno zgodi pri temperaturni inverziji (stabilna atmosfera) ali pri širjenju v smeri vetra. V tem primeru se jakost zvoka običajno poveča le malenkostno, tipično za manj kot 3 dB (NPL 2007, A11-13).



Slika 71: Uklon poti zvočnega valovanja v normalnih atmosferskih pogojih in pri širjenju zvoka v smeri proti vetru (neugodne razmere za širjenje zvoka) (levo) ter pri temperaturni inverziji in pri širjenju v smeri vetra (ugodne razmere za širjenje zvoka) (desno) (prirejeno po NPL 2007, A11-13).

Figure 71: Sound curvature under temperature inversion and/or downwind conditions (left) and under temperature inversion and/or downwind conditions (right) (based on NPL 2007, A11-13).

Poleg poznavanja krajevnih mikroklimatskih razmer, je treba podnebne podatke še preračunati v *deleže ugodnih razmer za širjenje zvoka*. Načini za tovrstni izračun so različni glede na metodo računanja širjenja zvoka. Metoda NMPB upošteva le dnevne in nočne krajevne deleže ugodnih razmer, saj je z meteorološkega stališča večerni čas (med 18:00 in 22:00) pozimi noč, poleti pa dan. Podatki za večer se zaradi zahtev Direktive o hrupu upoštevajo le pri letnem povprečju. Wölfel et al. (2003a, 5-6) predlagajo, da se zaradi uporabnosti meteoroloških popravkov na le nekaterih tipih uravnanega terena v regijah, ki leži pod 500 m nadmorske višine, začasnosti (prehodne) metode in visokih stroškov preračunavanja uporabljajo standardne, precenjene letne vrednosti ugodnih razmer in sicer 50 % za dnevni, 75 % za večerni in 100 % za nočni čas.

Metoda Harmonoise oziroma njena, v projektu Imagine, dopolnjena različica krajevne meteorološke razmere opiše v štirih razredih ugodnosti za širjenje zvoka. Ta klasifikacija ustreza tako napovedovalnim modelom, kot meritvam. Iz prvih, drugih ali kombinacije obeh se izračuna dolgoročne ravni zvoka z upoštevanjem pojavljanja vsakega razreda širjenja v klimatološko relevantnem letu (Hemsworth 2007, 3). Razrede ugodnosti za širjenje zvoka izračunamo iz klasificiranih podatkov komponente hitrosti vetra v smeri širjenja in stabilnosti atmosfere (ocenjena glede na delež oblačnosti in del dneva). Heimann in

Salomons (2004) podajata oceno kako in do kakšne mere podnebni podatki določajo letno povprečno raven zvoka na srednje in dolge razdalje (do 1 km), izračunano z metodo Harmonoise. Ugotavljata, da popolno zanemarjanje podnebnih podatkov lahko povzroči napake do 9 dB na razdalji 1 km, medtem ko že uvedba devetih meteoroloških razredov te napake zmanjša na 2 dB z 80 % gotovostjo.

Povzamem lahko, da so za modeliranje ravni zvoka v okolju pomembne naslednje podnebne spremenljivke:

- višinska temperaturna razslojenost, ki je običajno poenostavljena s povprečno temperaturo zraka 2 m nad tlemi (kot se meri na meteoroloških postajah),
- delež oblačnosti (izražen v osminah pokritosti neba z oblaki),
- smer in hitrost vetra 10 m nad tlemi ter
- relativna vlažnost zraka, ki (ob njegovi temperaturi) vpliva na atmosfersko absorpcijo.

Kljub temu, da so mi bili meteorološki podatki za postajo v Ljubljani na voljo (za veter, vlažnost, temperaturo zraka in oblačnost) ter sem imel tudi krajevne podatke o smereh in hitrostih vetra 10 m nad tlemi v kilometrski mreži<sup>19</sup>, jih zaradi zapletenosti preračunavanja v deleže ugodnih razmer širjenja nisem uporabil. Za celotno območje bi moral namreč izdelati preračun, ki poleg samih podnebnih podatkov upošteva tudi prostorska razmerja med virom

---

<sup>19</sup> Za oceno vetrovnosti je bil uporabljen dinamični numerični modelski pristop, ki je na meritve vezan le posredno: preko vhodnih podatkov vseh meteoroloških količin (ne le vetra) v veliki prostorski skali celotnega ozračja in ob koncu, ko so izračunane vrednosti primerjane z izmerjenimi v nekaterih točkah. Prilagoditve polja vetra na manjšo prostorsko skalo so izračunane z meteorološkimi modeli, ki se v današnjem času v meteoroloških službah uporabljajo za kratkoročno napovedovanje vremena in ki lahko služijo tudi za klimatske študije – če se z njimi simulira dogajanja skozi več let ali celo desetletij – v tem primeru za osem let: 1994–2001. Vhodni podatki so bile reanalize Evropskega centra za srednjeročno napoved (ECMWF) v ločljivosti 120 km, nato so bili z gnezdenjem rezultatov v modelih Aladin pridobljeni rezultati: hitrost in smer vetra v kilometrski mreži nad Slovenijo na višinah 10, 25 in 50 m in v časovni skali 6 ur (ob 0., 6., 12., in 18. uri). Rezultati modela se ponekod bolj, drugje pa manj dobro prilegajo meritvam. Težave so predvsem v razgibanem terenu (Alpske doline) in na Primorskem (podcenjena burja). Na splošno so verjetno nekoliko podcenjeni rezultati na grebenih in gorskih vrhovih. Smeri vetra se večinoma dobro ujemajo z izmerjenimi (vsaj v točkah merilnih postaj, za doline, kjer postaj ni, tega ni moč oceniti) (Rakovec et al. 2009).

in posameznim sprejemnikom. Programsko orodje SoundPLAN namreč ne omogoča neposrednega vpisa podnebnih podatkov in samodejnega preračunavanja, pač pa je treba vstaviti že izračunane deleže ugodnih razmer in tudi to le za dan in noč. Iz istega razloga nisem izdelal dolgoročnih kart povprečne oblačnosti in temperature zraka 2 m nad tlemi iz podatkov daljinskega zaznavanja, pač pa v naslednjih odstavkih podajam le nekaj metod njihovega določevanja in pričakovane kakovosti v krajevnem in regionalnem merilu.

S satelitskimi sistemi *temperature zraka 2 m nad tlemi* ne moremo meriti neposredno, določamo lahko le temperaturo površja. Najprimernejši satelitski senzorji za določanje temperatur površja v srednji ločljivosti so SEVIRI (MSG 1)<sup>20</sup>, MODIS (Terra in Aqua)<sup>21</sup>, AVHRR (NOAA)<sup>22</sup> in ASTER (Terra)<sup>23</sup>. Ti senzorji delujejo v srednjem in dolgovalovnem (termičnem) infrardečem spektru elektromagnetnega valovanja in na podlagi tako zajetih podob lahko določimo temperaturo površja. Na nehomogenih območjih prostorska ločljivost

---

<sup>20</sup> Geostacionarni vremenski satelit MSG 1 (Meteosat Second Generation) je v naših krajih dobro poznan, saj ga skupaj upravljajo številne evropske države, njegove podatke pa uporabljamo za napovedovanje vremena tudi v Sloveniji. SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infra Red Imager), je najpomembnejši senzor na satelitu in ima 12 spektralnih kanalov. Trije vidni in bližnji infrardeči kanali satelita ustrezajo lastnostim senzorja AVHRR na satelitih NOAA. Poleg tega ima SEVIRI še osem kanalov v srednjem in termičnem delu infrardečega spektra, ki so namenjeni merjenju temperature oblakov in površja ter koncentracije vodne pare v ozračju (Oštir 2006, 86).

<sup>21</sup> MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) je senzor na satelitih Terra in Aqua, ki ju upravlja ameriška NASA. Satelita letita v tandemskem načinu, prvi prečka ekvator dopoldne (10:30), drugi popoldne (13:30). MODIS ima 36 spektralnih kanalov, ki so namenjeni opazovanju svetovne dinamike oblačnosti, sevalne bilance ter procesov v oceanih, na kopnem in v nižji atmosferi. Kanali so združljivi z nekaterimi predhodnimi senzorji na primer z AVHRR, SeaWiFS, ETM in HIRS. Podatke zajema v prostorski ločljivosti 250, 500 in 1000 m (Lindsey in Herring 2002).

<sup>22</sup> AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) je najpomembnejši senzor na satelitih NOAA. Uporabljamo ga tako v meteorologiji kot tudi pri opazovanju Zemlje v majhnem merilu. Senzor ima 6 kanalov in zaznava valovanje v vidnem, bližnjem, srednjem in termičnem infrardečem delu elektromagnetnega spektra v pasu širine 3000 km, s prostorsko ločljivostjo 1,1 ali 4 km (Oštir 2006, 84).

<sup>23</sup> Senzor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), nameščen na satelitu Terra, je namenjen detajlnemu kartiranju temperature površja, odbojnosti in nadmorske višine. Podatke zajema s 14 kanali v vidnem ter bližnjem infrardečem (VNIR, ločljivost 15 m), srednjem infrardečem (SWIR, ločljivost 30 m) in termičnem infrardečem delu elektromagnetnega spektra (TIR, ločljivost 90 m). Dodaten kanal v bližnjem infrardečem delu spektra, obrnjen nazaj, zagotavlja stereo pokritost v istem preletu (Abrams in Hook 2002).

teh podob ne zadošča potrebam nekaterih aplikacij, vendar je bilo do sedaj le malo raziskav usmerjenih v izboljšanje prostorske ločljivosti temperature površja, pridobljene z daljinskim zaznavanjem (Zakšek 2007, 123). Zvezno polje temperature zraka je mogoče izračunati s prostorsko interpolacijo temperature na podlagi drugih dejavnikov v prostoru, ki vplivajo na njeno prostorsko porazdelitev (Dolinar 2004; Zakšek 2007), ali na podlagi temperature površja, pri čemer so potrebni še drugi podatki in poznavanje zveze med sevalno temperaturo površja in temperaturo zraka (Zakšek 2007). Zakšek (2007) ugotavlja, da zagotavlja interpolacija boljše rezultate na večini postaj po Sloveniji ter, da je točnost rezultatov pri tej metodi neodvisna od hitrosti vetra, medtem ko je pri parametrizaciji iz temperature površja točnost metode manjša pri močnejšem vetru. Točnost interpolacije  $1,6\text{ °C}$  v  $100\text{ m}$  mreži je bila dosežena z multiplo regresijsko analizo s pojasnjevanjem temperature na podlagi podatkov, izpeljanih iz digitalnega modela višin v ločljivosti  $100\text{ m}$  (kvaziglobalna osončenost, višinska razlika od okolice ter višina, nagib, usmerjenost in razgibanost reliefa), podatkov o pokrovnosti (umetno izdelan vegetacijski indeks, razdalja do morja, razdalja do gozda) in upoštevanjem satelitskih podatkov senzorja MODIS (normiran diferencialni vegetacijski indeks (NDVI), izboljššan vegetacijski indeks (EVI) in temperatura površja). Hkrati avtor podaja parametrizacijo temperature zraka v srednji prostorski in visoki časovni ločljivosti na podlagi podatkov satelitskih senzorjev ter podatkov o reliefu in rastju. Izdelana nova parametrizacija temelji na razlikah med temperaturo površja in temperaturo zraka. Te so bile pojasnjene z multiplo regresijo kratkovalovnega sevanja (popravljenega za vpliv albeda), dolgovalovnega sevanja, kosinusa zenitne razdalje množenega z naravnim logaritmom NDVI in vetra. Srednja kvadratna napaka (angl. root mean square error, RMSE) v Sloveniji je  $1,8\text{ °C}$ .

*Dolgoročno ocenjevanje oblačnosti* je mogoče z več satelitskimi sistemi, vendar je za potrebe modeliranja zvočnih ravni bolje izbrati že uveljavljene izdelke – maske oblačnosti. Kartiranje oblačnosti je med pomembnejšimi nalogami Eumetsatovega Centra za satelitske aplikacije, ki podpira zelo kratkoročno in zdajšnje napovedovanje vremena (Satellite Application Facility (SAF) on support to nowcasting and very short range forecasting). Maske oblakov izdelujejo za senzorje AVHRR in SEVIRI. Izdelava kart mask oblakov iz podatkov senzorja AVHRR uporablja vse razpoložljive kanale, podatke kratkoročne numerične napovedi vremena ter podatke o višini in rabi tal. Rezultati ocene natančnosti

(Thoss 2008 in 2009) za srednjo Evropo kažejo na majhen pozitiven odklon (2 %), s precinitvijo nad morjem in podcenjevanjem nad kopnim. Algoritem ugotavljanja oblačnosti najslabše deluje ob mraku ter za gorata in obalna območja, najboljše pa podnevi in nad morjem. V povprečju je ocena oblačnosti pri povsem brezoblačnem vremenu (nič osmin) precejšena za osmino in pol in podcenjena za približno osmino pri povsem oblačnem vremenu (osem osmin). Podoben algoritem je uporabljen za ugotavljanje mask oblačnosti, izdelanih na podlagi senzorja SEVIRI, ki imajo v naši geografski širini ločljivost približno 5 km. Analiza kakovosti, ki so jo opravili Derrien et al. (2005), razkrije 95 % ujemanje s testnimi podatki v srednjih geografskih širinah s 4 % podcenjeno oblačnostjo v pikslih z oblaki in 6 % precejšeno oblačnostjo v brezoblačnih pikslih. Primerjava dolgoročnih povprečnih mask pridobljenih za oba senzorja za štiri sezonsko značilne mesece (april, julij, oktober in december) je navedena v (Johnston in Karlsson 2007). Standardni izdelek je tudi maska oblakov, izdelana iz posnetkov senzorja MODIS, v ločljivosti 1 km in 250 m. Zaradi večjega števila spektralnih kanalov in višje prostorske ločljivosti od ostalih pasivnih senzorjev za operativno kartiranje oblačnosti ima MODIS večje zmogljivosti razločevanja oblakov od kopnega, vodnega ali sneženega ozadja. Oblaki so označeni z nekoliko spremenjenim algoritmom APOLLO<sup>24</sup>, ki je eden izmed algoritmov za določevanje oblačnosti iz posnetkov senzorjev AVHRR. Maskirni algoritem je osnovan na seriji testov pragov odbojnih vrednosti za vsak piksel. Vsak izmed preizkusov, ki delujejo z različnimi valovnimi dolžinami, poda verjetnost, da je piksel oblačen, končna ocena pa je izdelana s kombinacijo ocen posameznih preizkusov (Ackerman et al. 1998; Baum in Platnick 2006). Ackerman et al. (2008) navajajo, da je stopnja ujemanja med masko oblakov MODIS ter kombinacijo radarskih in lidarskih meritev oblačnosti s sistemom ARSCL približno 83 %, pri čemer je razlika največkrat pri oblakih z vrhom višje od 8 km. Kotarba (2009) podaja primerjavo z vizualnimi talnimi opazovanji oblačnosti in navaja, da MODIS zazna 4 % večjo oblačnost poleti in 7 % pozimi, s korelacijo 0,84 poleti in 0,70 pozimi. Zimska vrednost je nižja od poletne zaradi slabše nočne korelacije. Primerjava med maskama oblakov,

---

<sup>24</sup> Algoritem APOLLO je razširjen tako, da upošteva dodatne spektralne informacije senzorja MODIS (Ackerman et al. 1998).

izdelanima iz posnetkov AVHRR in MODIS, in podatki satelitskega laserskega sistema CALIOP, nameščenega na satelitu Calipso, razkrije, da je na maski MODIS pravilno označenih več oblačnih pikslov in da je napaka pri teh manjša, pri maski AVHRR pa velja isto za piksele brez oblakov (Thoss 2009; preglednica 25).

Preglednica 25: Ocena natančnosti maske oblakov pridobljene iz podatkov senzorja AVHRR, kot primerjava s podatki satelita Calipso in masko oblačnosti senzorja MODIS (Thoss 2009, 24).

Table 25: Accuracy measures and verification scores for the AVHRR cloud mask as compared to Calipso and the MODIS cloud mask (Thoss 2009, 24).

	pravilno določeni - oblačno [%]	pravilno določeni - jasno [%]	napačno določeni - oblačno [%]	napačno določeni - jasno [%]	pristranskost [%]
Calipso – AVHRR	89,3	97,4	10,7	2,6	-8,8
Calipso – MODIS	94,7	90,5	5,3	9,5	-3,2

## 4.9 Ostali podatki

Pri oceni širjenja zvoka cestnega prometa sta ključni spremenljivki, ki ju ne moremo pridobiti z daljinskim zaznavanjem, število in hitrost vozil, pri oceni vpliva pa število prebivalcev na bivalno enoto.

### 4.9.1. Štetje prometa in hitrosti

Urne podatke o številu in hitrostih vozil za leto 2007 je posredovala Direkcija Republike Slovenije za ceste (DRSC). Urni podatki o številu vozil po kategorijah ter povprečnih urnih hitrostih za vozni in prehitevalni pas, v smeri od Ljubljane proti Vrhniki, so na voljo za števno mesto 854 (Drenov grič AC). Kategoriji lahkih in težkih vozil, ki jih potrebujemo pri izračunu hrupa z metodo XP S 31.133, sem izračunal s seštetjem števila motorjev, osebnih avtomobilov in lahkih tovornih vozil s težo do 3,5 t za prvo ter avtobusov in vseh ostalih tovornih vozil (srednje težka in težka tovorna vozila, tovorna vozila s priklopniki in vlačilci) za drugo kategorijo. Iz povprečja razmerij med obema kategorijama za posamezne dneve in ure in podatkov števnega mesta 800 (Cestninska postaja Ljubljana) sem izračunal števila vozil za manjkajoče datume. Hitrosti za manjkajoče podatke so privzete iz povprečnih hitrostih za ustrezne dneve in ure. Zaradi zaprtja avtocestnega odseka pri števcu 854



manjkajo podatki med 24.9. in 3.10. ter od 28.12. dalje, med 4.12 in 28.12. pa ni deloval razločevalnik kategorij vozil.

Pri izračunu povprečnih hitrosti za obe kategoriji sem predpostavil, da je največja hitrost tovornih vozil 90 km/h in da vsa težka vozila vozijo po voznem pasu, kjer to dopuščajo meritve po števcu, preostalo število pa se »prelije« na prehitevalni pas. Hitrosti sta bili izračunani glede na spodnje enačbe:

$$v_{TV} = \begin{cases} v_{vozni\_pas} & v_{vozni\_pas} \leq v_{TV\ max} \\ v_{TV\ max} & v_{vozni\_pas} > v_{TV\ max} \end{cases}, \quad (13)$$

$$v_{LV1} = v_{prehitevalni\_pas}, \quad (14)$$

$$v_{LV2} = \begin{cases} v_{vozni\_pas} & v_{vozni\_pas} \leq v_{TV\ max} \\ \frac{v_{vozni\_pas} \cdot n_{vozni\_pas} - v_{TV\ max} \cdot n_{TV}}{n_{vozni\_pas} - n_{TV}} & v_{vozni\_pas} > v_{TV\ max} \end{cases} \text{ in} \quad (15)$$

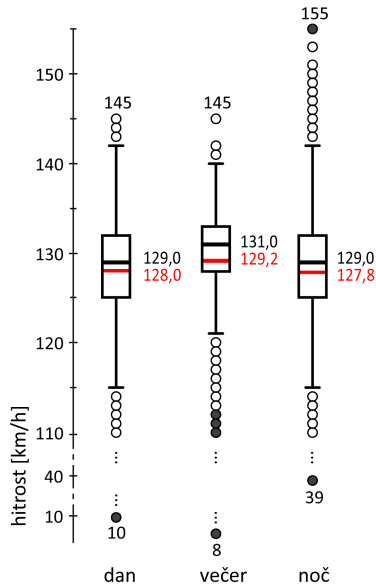
$$v_{LV} = \frac{v_{LV1} \cdot n_{prehitevalni\_pas} + v_{LV2} \cdot (n_{vozni\_pas} - n_{TV})}{n_{LV}}, \quad (16)$$

pri čemer so:

$v_{TV}$	hitrost težkih vozil
$v_{TV\ max}$	omejitev hitrosti za težka vozila
$v_{LV1}$	hitrost lahkih vozil na prehitevalnem pasu
$v_{LV2}$	hitrost lahkih vozil na voznem pasu
$v_{LV}$	hitrost lahkih vozil
$n_{TV}$	število težkih vozil
$n_{LV}$	število lahkih vozil
$n_{vozni\_pas}$	število vozil na voznem pasu
$n_{prehitevalni\_pas}$	število vozil na prehitevalnem pasu in
$n$	število vseh vozil.

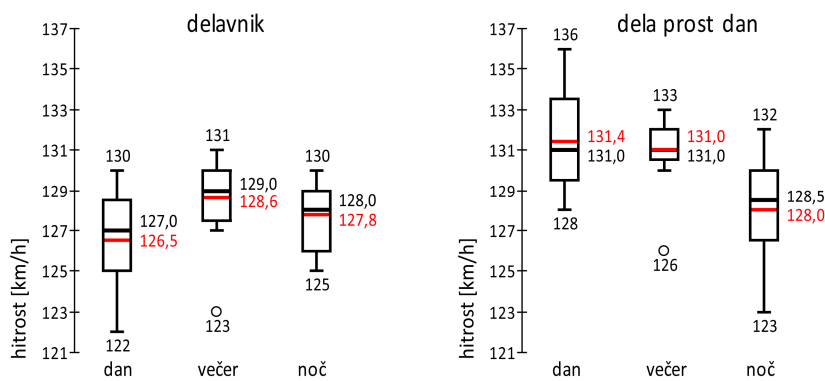
Izjema je nekaj primerov, ko je bil vozni pas zaprt. V tem primeru sta za izračun hitrosti težkih in lahkih vozil uporabljeni enačbi za izračun  $v_{TV}$  in  $v_{LV2}$ , pri čemer je namesto voznega

pasu upoštevan prehitevalni pas. Število lahkih vozil na voznem pasu sem izračunal z odštetjem števila težkih vozil od števila vozil na voznem pasu, ko je bilo drugo večje od prvega.



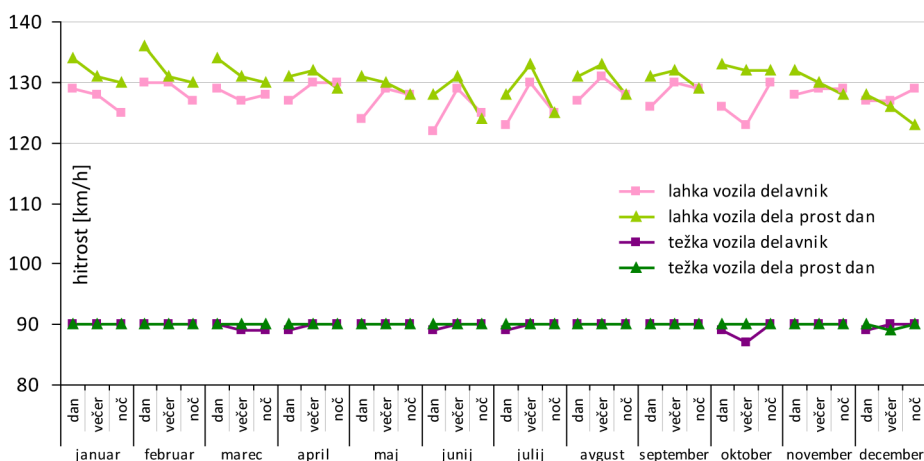
Slika 72: Intervalni grafikon hitrosti lahkih vozil čez dan, zvečer in ponoči za podatke celega leta. Odebeljena rdeča črta označuje povprečje, črna mediano. Izračuni potrjujejo, da lahko pri računanju povprečnega letnega hrupa na izbranem odseku privzamemo administrativno omejitev hitrosti za lahka vozila (130 km/h), kot privzeto vrednost za vsa tri časovna obdobja, brez pomembnih napak v izračunu jakosti zvoka (poglavje 5.1).

Figure 72: Box plot of light vehicles' speed during day, evening and night for data of a whole year. Bold red line is mean and black average. Results confirm that administratively assigned maximum speed value for light vehicles (130 km/h) can be used for average yearly noise calculations on the studied highway section for all three periods, without introducing significant errors.



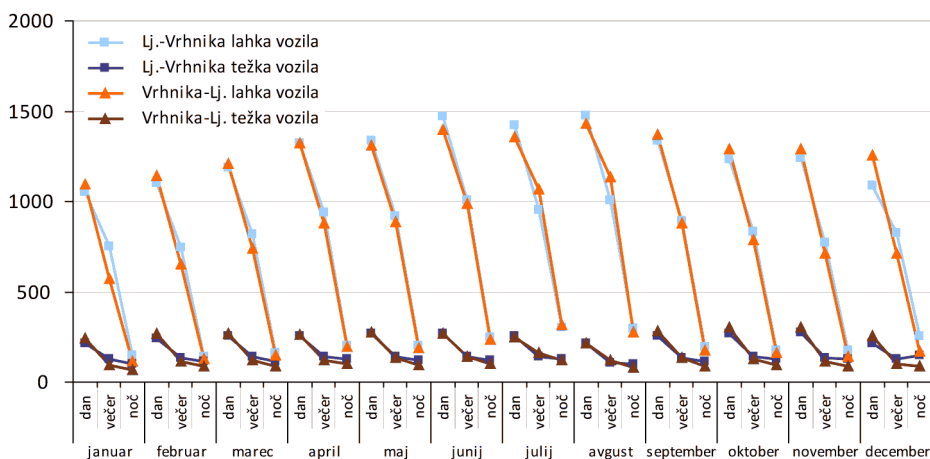
Slika 73: Intervalni grafikon povprečnih mesečnih hitrosti lahkih vozil čez dan, zvečer in ponoči za povprečen delavnik (levo) in dela prost dan (desno). Odebeljena rdeča črta označuje povprečje, črna mediano.

Figure 73: Box plot of mean monthly light vehicles' speed during day, evening and night for an average working (left) and off day (right). Bold red line is mean and black average.



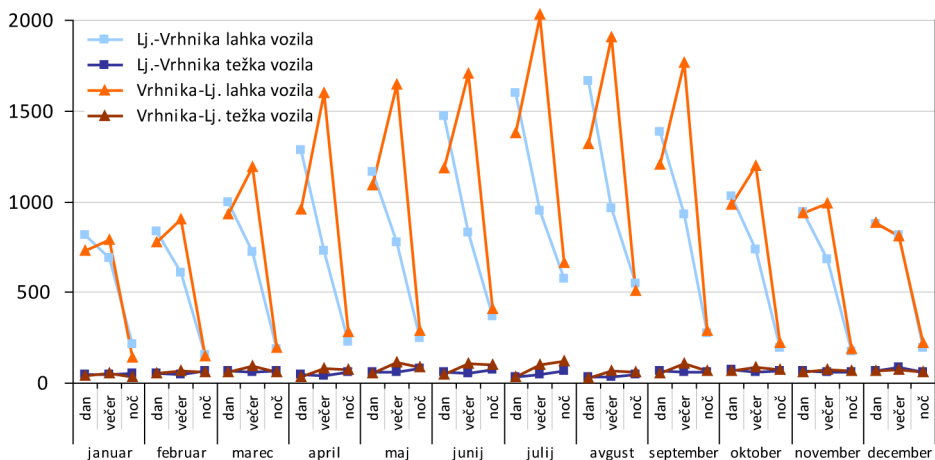
Slika 74: Grafikon povprečnih mesečnih hitrosti vozil.

Figure 74: Mean monthly vehicle speeds.



Slika 75: Grafikon povprečnega števila vozil v delavniku.

Figure 75: Mean number of vehicles on a workday.



Slika 76: Grafikon povprečnega števila vozil na dela prost dan.

Figure 76: Mean number of vehicles on a work-free day.

Čeprav se v študijah hrupa za največjo hitrost težkih tovornih vozil običajno uporablja administrativno določena vrednost 80 km/h, je na izbranem odseku glede na meritve in izračune bolj smiselno upoštevati hitrost 90 km/h. Pri nižji vrednosti prihaja do anomalij, kot so približno enake ali višje hitrosti lahkih vozil na voznem pasu, kot na prehitevalnem. Zaradi drugače nerealno visoke hitrosti lahkih vozil na voznem pasu (nad 200 km/h) je bilo treba pri dveh vnosih (28.12 ob 3:00 in 4:00) hitrost težkih vozil ročno nastaviti na 110 oziroma 115 km/h.

Za smer vožnje od Vrhnike proti Ljubljani sem uporabil podatke o številu vozil števnege mesta 800. Upoštevano je enako razmerje med kategorijama in hitrosti, kot v smeri od Ljubljane proti Vrhniki.

#### 4.9.2. Vrsta rabe stavb

Vrsta rabe je bila stavbam določena iz atributnega dela katastra stavb, ki sledi enotni klasifikaciji vrst objektov (Uredba o uvedbi in uporabi enotne klasifikacije vrst objektov ... 2003). Stavbam z atributom neznan in novim zgradbam sem vrsto rabe stanovanjska/nestanovanjska pripisal na podlagi podatkov o stalnem prebivališču (vsaj en stalni prebivalec iz Centralnega registra prebivalstva). Pri tem so možne napake, saj nove stanovanjske stavbe niso nujno že naseljene, vendar jih je zelo malo. Najbolj očitne sem odpravil ročno. Poseben atribut sem pripisal stavbam splošnega družbenega pomena (stavbe za kulturo in razvedrilo, muzeji in knjižnice, stavbe za izobraževanje in znanstvenoraziskovalno delo, stavbe za zdravstvo, športne dvorane).

#### 4.9.3. Število prebivalcev na bivalno enoto

Podatke o številu stalno prijavljenih oseb na bivalno enoto (hišno številko) (stanje 2.2.2009) sem pridobil iz Centralnega registra prebivalstva, ki ga vodi Ministrstvo za notranje zadeve. Zaradi zaokroženih in ponekod netočnih koordinat jih je bilo treba mestoma ročno popraviti, da so se zapisi prilegali ustreznim stavbam (tovrstnih primerov je bilo na študijskem območju 4,3 %).

## 5 IZRAČUNI RAVNI ZVOKA

Izračuni ravni zvoka so bili opravljeni v programskem okolju SoundPLAN, različica 6.5, z metodo NMPB. Poleg samih vrednosti ravni jakosti zvoka v okolju na letni in mesečni ravni, so me zanimale tudi razlike v ravneh zaradi upoštevanja različnih hitrosti vozil (merjenih in administrativnih) ter razlike, ki so posledica uporabe različnih vhodnih podatkov.

Ker je merjenje vseh relevantnih okoljskih parametrov na poti širjenja zvoka nepraktično in zaradi kompleksnosti razmer v ozračju, sem pri računanju ravni zvoka na študijskem cestnem odseku privzel številne predpostavke in poenostavitve, ki kolikor mogoče ustrezajo tudi stanju v naravi.

Predpostavke za prometne podatke:

- vir zvoka je sredinska linija voznega pasu,
- tip obrabnega sloja cestišča (običajen asfalt) je enak za vse študijsko območje,
- vozna površina je brez večjih neravnin in
- prometni tok je tekoč (brez pomembnega deleža pospeševanj in zaviranj).

Predpostavke za podatke o stavbah:

- vse stavbe so zgrajene iz enakega gradbenega materiala, ki je akustično trd,
- vse stavbe imajo ravne strehe in
- pri sprejemnikih na fasadah ni upoštevan odboj od lastne fasade.

Ostale predpostavke:

- pri izračunu ravni zvoka je kot vir upoštevan samo promet na avtocesti, hrup ozadja pa je zanemarjen,
- za vremenske razrede ugodnosti za širjenje zvoka so upoštevane privzete vrednosti.

Na izračun ravni zvoka vplivajo še druge nastavitve, prikazuje jih preglednica 26.

Preglednica 26: Nekatere pomembnejše nastavitve računanja ravni zvoka.

Table 26: Noise calculation settings.

kotni razmik [°]*	1
število odbojev	1
največji razdalja med virom in sprejemnikom [m]	5000
toleranca napake [dB]	0,0
iskanje vseh odbojev v bližini vira	upoštevano

\* Iz sprejemnika se širijo »žarki« s stalnim kotnim razmikom. Na vsako presečišče teh žarkov z linijo vira je postavljena točka, ki ponazarja mesto širjenja zvoka.

## 5.1 Primerjava emisijskih ravni zvoka

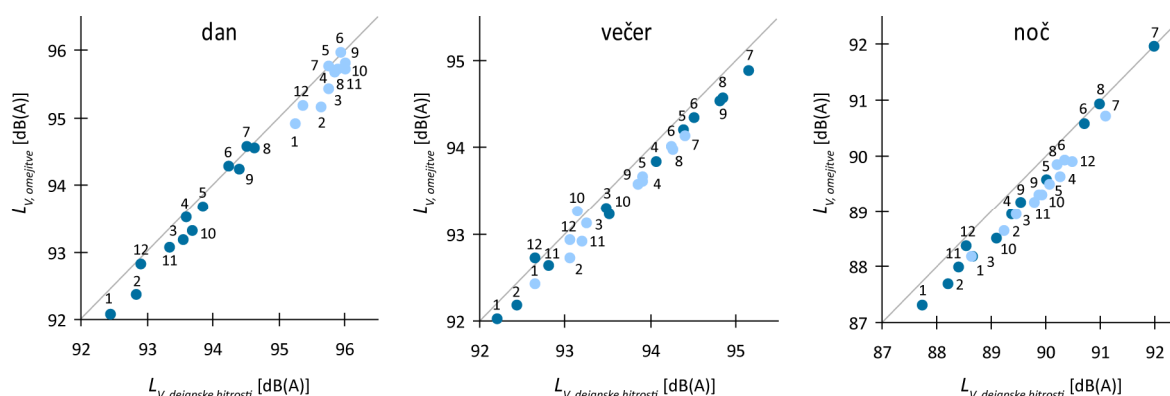
Naredil sem primerjavo emisijskih ravni zvoka, ob upoštevanju dejanskih povprečnih hitrosti vozil in zakonsko predpisanih omejitev, po mesecih in ob razdelitvi na delavnik oziroma dela prost dan, za dan, večer in noč. Zaradi upoštevanja prometnih tokov v obe smeri sem moral emisije zvoka sešteti (logaritemsko), kar se stori z enačbo (Wilmink et al. 2006, 17):

$$L_{skupna} = 10 \cdot \log \left( \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right), \quad (17)$$

kjer je  $L_{skupna}$  sešteta ekvivalentna raven jakosti zvoka ter  $L_i$   $n$  posameznih ravni jakosti zvoka linijskih virov, ki jih seštevamo. Podobno izračunamo povprečno vrednost (Wilmink et al. 2006, 17):

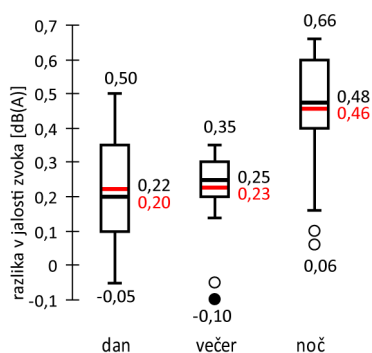
$$L_{povprečna} = 10 \cdot \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right) = 10 \cdot \log \left( \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right) - 10 \cdot \log n. \quad (18)$$

Izkazalo se je, da so razlike med izračunanimi ravnmi jakosti zvoka razmeroma majhne (slika 77 in slika 78), največja znaša 0,7 dB(A) (za delavnik oktobra in novembra), povprečno pa 0,3 dB(A). To pomeni, da so ob upoštevanju predpisanih omejitev hitrosti, v povprečju za toliko podcenjene tudi ravni zvoka. Razlike so nekoliko manjše poleti, kot pozimi. Med delovnimi in dela prostimi dnevi pa jih domala ni.



Slika 77: Grafi primerjave emisijskih ravni zvoka. Na abscisi so prikazane mesečne ekvivalentne jakosti zvoka vira ob upoštevanju dejanskih povprečnih hitrostih vozil in na ordinati ob upoštevanju zakonsko predpisanih omejitev. Vrednosti za dela proste dni so prikazane s temno modro, za delavnike pa s svetlo modro barvo (številke označujejo mesece). V mesecih tople polovice leta so emisije višje.

Figure 77: Comparative diagrams of noise emission values. Monthly equivalent sound power levels computed considering actual average vehicle speeds are plotted on the abscissa axis and considering administratively defined speed limits on the ordinate axis. Values for work free days are presented with pink dots and for workdays with blue dots (numbers represent months). Months from a warmer season suffer higher noise emissions.



Slika 78: Intervalni grafikon mesečnih razlik jakosti zvoka vira ob upoštevanju dejanskih povprečnih hitrosti ali administrativne omejitve. Razlike so največje ponoči, vendar so v splošnem zelo majhne.

Figure 78: A box plot of monthly differences in noise emissions between calculations with actual mean vehicle speeds and administratively defined speed limits. Differences are biggest at night, however generally very small.

## 5.2 Primerjava ravni zvoka v okolju ob upoštevanju različnih vhodnih podatkov

V tem poglavju podajam primerjavo ravni zvoka ob upoštevanju podatkov, pridobljenih z različnimi metodami, ki je uporabna tudi za študij vpliva uporabe obstoječih baz prostorskih

podatkov na izračunane ravni zvoka. Za referenčne podatke sem izbral podatke, kot so bili uporabljeni tudi pri izračunu mesečnih in letnih ravni zvoka ( $L_{DVN}$ ) za celotno študijsko območje, le da so za hitrosti upoštevane omejitve hitrosti in da so sprejemniki 2 m nad tlemi ter da niso upoštevani nadvoz, lomne linije reliefa, protihrupne pregrade in impedanca tal.

Zaradi narave preizkusa sem upošteval večjo gostoto sprejemnikov, kot pri izračunu za celotno območje. Vzporedno ob cesti so sprejemniki nameščeni vsakih 25 m, na razdalji vsakih 10 m prvih 50 m od ceste in nato na razdalji 25 m do 200 m od ceste. Na razdalji večji od 200 m od ceste, so nameščeni v 25 m pravokotni mreži (slika 79). Dodatni sprejemniki pred fasadami stavb so premaknjeni tako, da se ne prekrivajo z obodi stavb iz lidarskih podatkov.

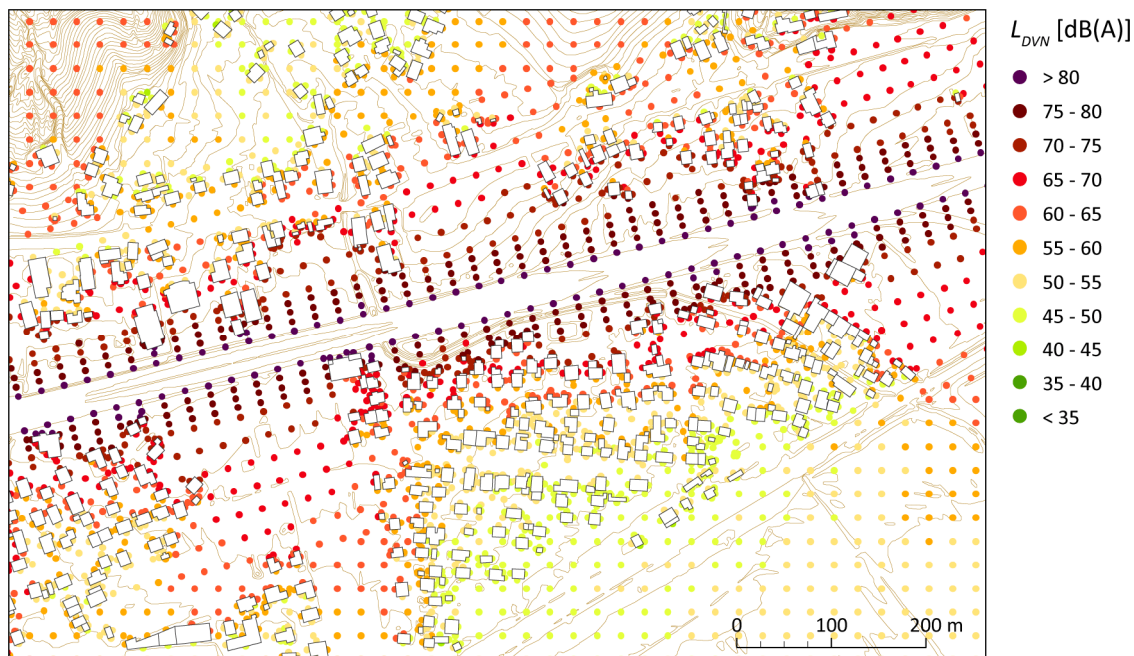
Osnovni (referenčni) podatki in pogoji, ki sem jih izbral zaradi primerljivosti z ostalimi izračuni, torej, če dodajamo podatke (na primer o impedanci tal) ali jih spreminjamo (na primer višino sprejemnikov), so:

- obodi stavb iz ročno popravljene katastra stavb,
- višini slemena in baze stavb iz lidarskih podatkov,
- plastnice iz lidarskih podatkov,
- linija ceste in njena višina iz lidarskih podatkov,
- povprečni letni promet,
- hitrosti 130 km/h za lahka vozila in 80 km/h za težka vozila in
- višina sprejemnikov 2 m nad tlemi.

Preizkušal sem, kakšne so razlike v  $L_{DVN}$  ob upoštevanju različnih podatkov o stavbah in sicer z obodi iz ročno popravljene katastra ter višinami slemena in kapi iz lidarskih podatkov, višinami slemena iz katastra ter obodi in višinami kapi iz lidarskih podatkov. Prav tako so me zanimale razlike ob upoštevanju različnih impedančnih kart. Ker se pri ocenjevanju vpliva hrupa znotraj zgradb upošteva višina sprejemnikov 4 m nad tlemi, sem primerjal tudi razliko v jakosti zvoka na sprejemnikih, ki so 2 m nad tlemi, saj z njimi lahko podamo oceno jakosti zvoka v približni višini gibanja ljudi na prostem, kar je uporabno pri ocenah motečega vpliva zvoka na rekreacijske, turistične, športne in druge dejavnosti na



prostem. Ugotavljal sem še, kakšen vpliv imajo lomne linije, protihrupne pregrade in kombinacija obojih ter kakšne so razlike v jakosti zvoka, če upoštevamo le javno dostopne podatke. V nadaljnjem besedilu zadnje imenujem izračuni s podatki GURS.



Slika 79: Karta ravni jakosti zvoka za referenčni izračun.<sup>25</sup> Tanke rjave črte so metrske lidarske plastnice.

Figure 79: A reference data noise map. Thin brown lines are lidar derived 1 m contours.

Kljub temu, da so absolutne razlike, izražene v dB, razmeroma majhne (preglednica 27), so pomenljive. Za pravilno interpretacijo rezultatov je namreč pomembno razumeti vpliv spremembe števila vozil na izračunano emisijo zvoka. Povprečno raven zvoka linijskega vira ( $L_{W,linija}$ ) določimo z enačbo (Wilmink et al. 2006, 16):

$$L_{W,linija} = L_{W,0} + 10 \cdot \log\left(\frac{Q}{1000 \cdot v}\right), \quad (19)$$

kjer so  $L_{W,0}$  emisija zvoka posameznega vozila v dB, Q število vozil na uro in  $v$  njihova hitrost v km/h. To pomeni, da se mora za povečanje ravni zvoka za 1 dB pretok vozil povečati za četrtno, šele pri podvojenem oziroma prepolovljenem pretoku vozil pa je

<sup>25</sup> V nadaljevanju sta prikazani še karta razlik v glasnosti zvoka za izračun s protihrupnimi pregradami in podatki GURS (14). Karte razlik za ostale izračune so v prilogi D.

sprememba ravni zvoka 3 dB. Razlika 3 dB je človeškemu ušesu komaj zaznavna, vendar iz danih podatkov sledi, da bi se moralo za enako spremembo ravni zvoka povprečno število vozil na dan na izbranem cestnem odseku iz 48.000 zmanjšati oziroma povečati na 24.000 oziroma 96.000 vozil na dan, kar je bistveno več od dejanskega razpona vrednosti. Hkrati pozitivna razlika 3 dB pomeni tudi, da na primer izofona kritične ravni jakosti zvoka ob prostih pogojih širjenja leži na približno še enkrat večji oddaljenosti od vira zvoka.

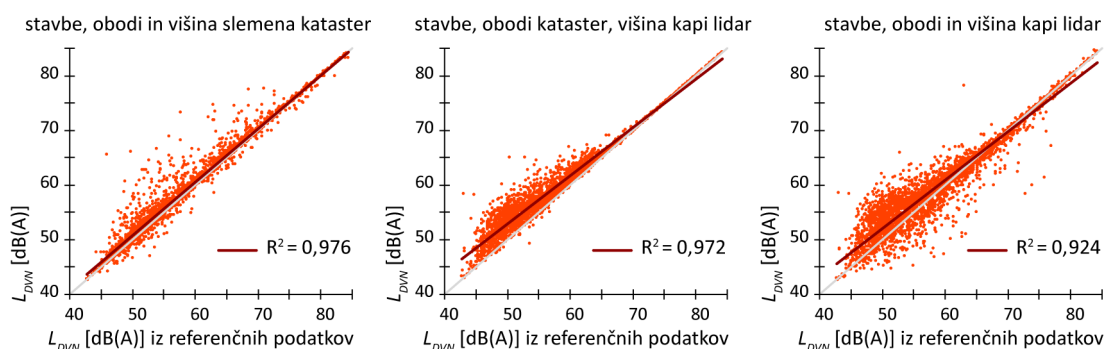
Preglednica 27: Preizkusne situacije za različne vhodne podatke in opisne statistike razlik v jakosti zvoka glede na referenčni izračun.

Table 27: Examined test data for calculating differences in environmental noise.

sprememba glede na referenčne podatke in pogoje	razlika $L_{DVN}$ [dB(A)] za testno območje O2			
	povprečje	SO	min	maks
višina slemena stavb iz katastra	1,1	1,5	-5,8	19,5
višina kapi stavb iz lidarskih podatkov	2,1	1,9	-4,2	15,2
obodi stavb iz lidarskih podatkov, višine stavb so višine kapi iz lidarskih podatkov	1,8	2,8	-14,5	15,4
impedanca iz lidarskih podatkov	0,7	0,4	0	2,4
impedanca iz posnetkov Landsat	1,6	0,9	0	5,0
impedanca iz posnetkov DOF	1,0	0,6	0	4,3
impedanca iz karte MKGP	1,7	0,9	0	4,8
impedanca iz karte Corine	0,8	0,4	0	2,0
višina sprejemnikov 4 m	2,3	1,6	-2,2	16,7
upoštevane lomne linije	0,0	0,1	-2,2	0,6
upoštevane protihrupne pregrade	-2,0	3,6	-14,8	0,7
upoštevane protihrupne pregrade in lomne linije	-2,0	3,6	-14,8	0,7
plastnice iz DMV 12,5	1,7	2,0	-8,7	19,9
višina slemena stavb iz katastra				
višina baze stavb iz katastra				
linija ceste iz lidarskih podatkov, višina iz DMV 12,5				
sprejemniki na višini 2 m, višina iz DMV 12,5				
isto kot prejšnji, le da je upoštevana še impedanca iz karte MKGP	3,4	2,3	-6,2	20,5
isto kot prejšnji, le da je linija ceste privzeta iz Zbirnega katastra gospodarske javne infrastrukture	3,4	2,3	-6,2	20,6

Ob upoštevanju višine slemena stavb iz podatkovne baze katastra stavb, se povprečna raven zvoka poveča za 1,1 dB, saj imajo na tem območju stavbe z laserskim skeniranjem ugotovljeno višjo višino, kot je zabeležena v katastru stavb oziroma kot je za manjkajoče podatke predpisana privzeta vrednost. Odstopanja so mestoma velika (slika 80, levo),

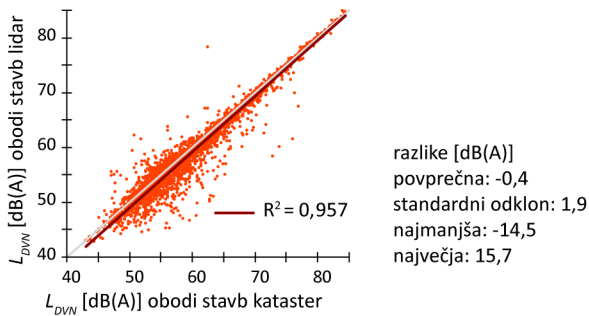
znašajo do 20 dB, vendar prostorsko zelo omejena na sprejemnike na fasadah zadevnih stavb oziroma njihovo najbližjo okolico. Če kot vrednost za višino stavbe vzamemo višino kapi, se rezultati bolje prilegajo dejanskemu stanju upadanja ravni zvoka za stavbo (Van Maercke 2007, 59-60). Na testnih podatkih in izračunu z metodo NMPB to pomeni v povprečju za več kot 2 dB višje ravni zvoka, kot če upoštevamo višine slemena stavb, kar 20 % sprejemnikov pa ima ravni zvoka višje od 3 dB(A). Razlika je razumljivo največja za stavbami, kar je hkrati zaskrbljujoče, saj so tam običajno »tiha« območja, namenjena prostočasnim dejavnostim. Na kartah ravni zvoka, ki ne upoštevajo višine kapi stavb, temveč višino slemena (tudi strateška karta hrupa), so ravni zvoka za stavbami podcenjene. Z grafikonov (slika 80 in slika 81) in kart (v prilogi D) je razvidno, da so izračunane ravni zvoka manj spremenljive na sprejemnikih, ki so neposredno na poti širjenja zvoka oziroma so izpostavljeni odbojem, t.j. tistih z visokimi ravnmi zvoka, saj nanje izbira podatkovne baze višin zgradb nima velikega vpliva. Na zastrtih sprejemnikih, ki imajo nižje ravni zvoka, do izraza pridejo odstopanja zaradi spremenljivosti v izračunih poti širjenja zvoka. To zelo nazorno prikazuje tudi slika 82, ki podaja razlike ravni zvoka posameznih izračunov v odvisnosti od razdalje od vira zvoka. Opaziti je, da je spremenljivost pri domala vseh izračunih najmanjša najbliže viru in največja na srednjih oddaljenostih, kjer prevladujejo stavbe. Pomembna izjema sta izračuna s protihrupnimi pregradami, saj imajo le-te največji vpliv na zmanjšanje ravni zvoka v svoji neposredni bližini v smeri stran od vira. Največji učinek imajo, ko zakrijejo kar največji višinski kot, zato so običajno postavljene povsem ob cestišču ali temu najbližjem nasipu.



Slika 80: Raztreseni grafikon primerjave referenčnega izračuna ravni zvoka in izračunov z različnimi podatki o stavbah. Temna črta je linearna regresijska premica

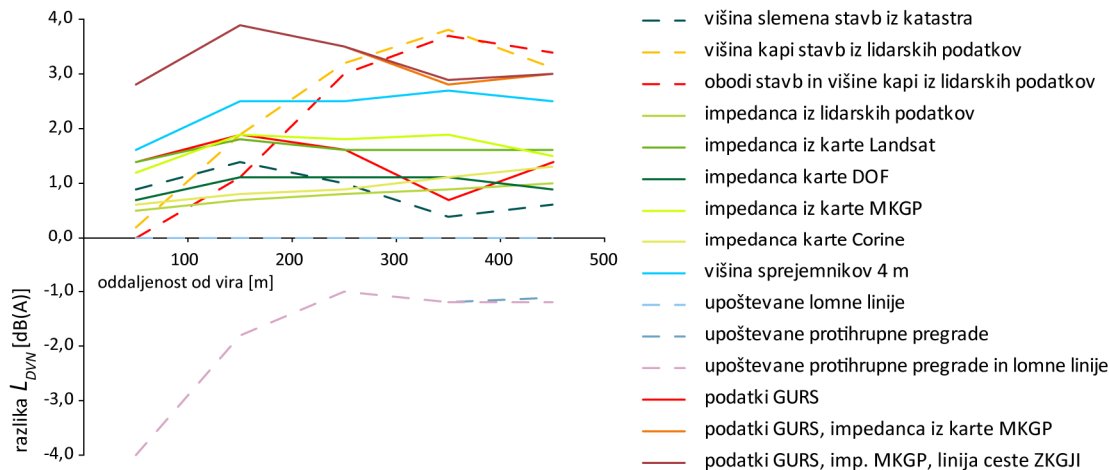
Figure 80: A scatter plots of the reference noise calculation and calculations with different data on buildings. A linear fit line is represented in dark red.

Razpršenost glasnosti zvoka pri upoštevanju samo podatkov laserskega skeniranja (obodi in višine kapi, slika 80, desno) je razmeroma velika, tudi ob primerjavi samo različno pridobljenih obodov (slika 81). Deloma je to posledica razčlenjenosti obodov stavb pridobljenih iz lidarskih podatkov, saj na tem sloju ni bila opravljena ortogonalizacija kotov vodilnih linij, zato prihaja do večjih lomov poti širjenja zvoka v različne smeri.



Slika 81: Rastreseni grafikon primerjave izračuna glasnosti zvoka pri različno pridobljenih obodih stavb. Na abscisi so izračunane glasnosti zvoka ob upoštevanju ročno popravljenega katastra, na ordinati pa ob upoštevanju (pol)samodejno pridobljenih obodov iz podatkov laserskega skeniranja. V obeh primerih so upoštewane višine kapi stavb. Temna črta je linearna regresijska premica.

Figure 81: A scatter plots of noise calculations with building footprints obtained from manually corrected cadastral data (on abscise) and (semi)automatically derived footprints from lidar data. Building height at eaves is considered in both cases. A linear fit line is represented in dark red.

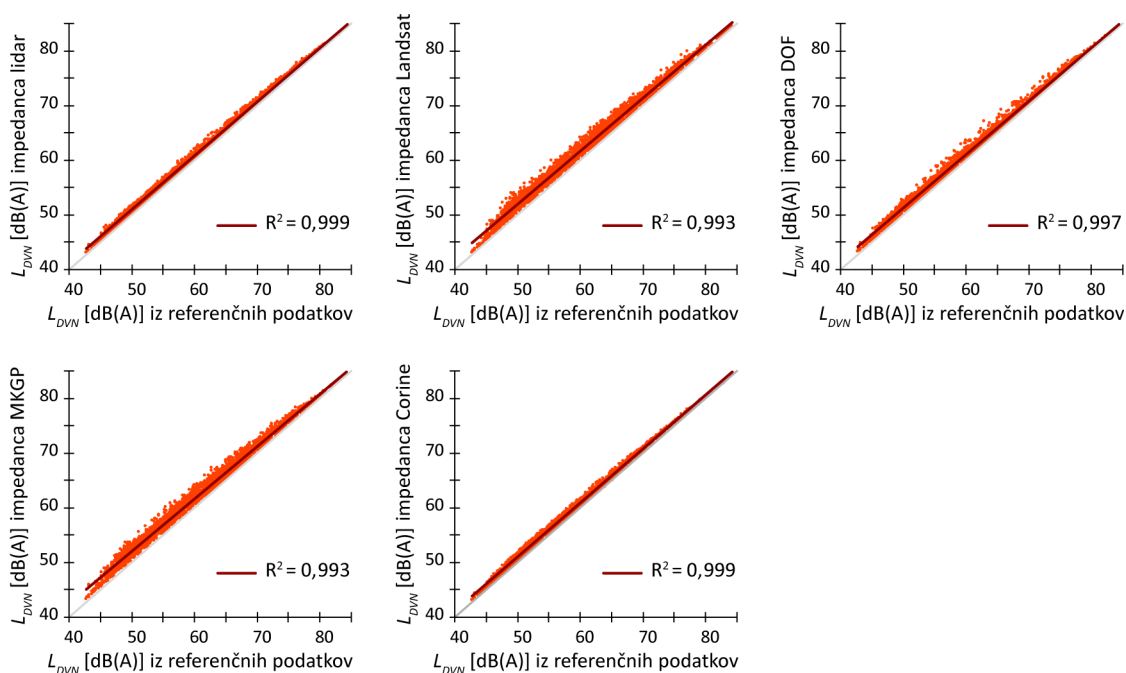


Slika 82: Primerjava izračunov jakosti zvoka glede na oddaljenost od vira.

Figure 82: A comparison of noise calculations according to distance of receivers to the source.

Upoštevanje različnih kart zvočne impedanca tal ima v nasprotju z različnimi podatki o stavbah bolj razširjen prostorski vpliv. Razpršenost razlik v izračunih je razmeroma majhna in neodvisna od jakosti zvoka, kar pomeni, da gre v primeru neupoštevanja zvočne

impedance za splošno podcenjevanje ravni zvoka v okolju (slika 83). Privzeta vrednost ekvivalentnega faktorja  $G$  je namreč 1 [0, 1], kar pomeni največji vpliv tal na zmanjšanje zvoka pri širjenju. Vpliv različnih impedančnih kart na izračunane ravni zvoka je v veliki meri odvisen od posplošenosti posamezne karte in načina njene izdelave. Iz obojega sledi določitev najmanjše enote kartiranja, od katere je v veliki meri odvisno, kako so obravnavana zemljišča med stavbami. Pri karti MKGP in klasifikaciji satelitskih posnetkov Landsat se prostor med zgradbami na gosto naseljenih območjih upošteva kot zvočno bolj »trd«, zato so pri uporabi teh kart tudi največje razlike v izračunih. Ker je zmanjšanje ravni zvoka odvisno od dolžine (in deleža) poti čez zvočno »mehka« zemljišča, so podcensene vrednosti referenčnega izračuna največje na sprejemnikih, ki so neposredno za zemljišči, ki so na kartah označena kot akustično trda, to je na zunanjih robovih naselij, gledano iz smeri vira zvočnih emisij.



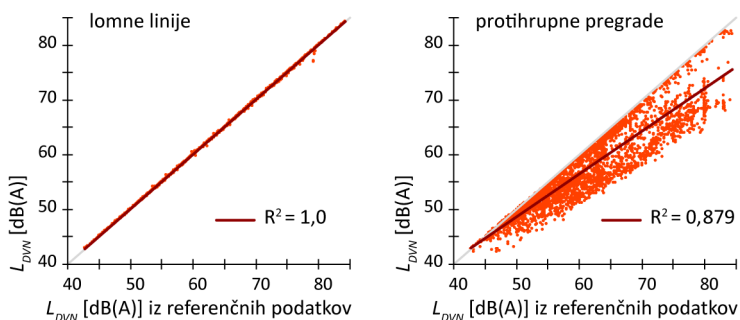
Slika 83: Rastreseni grafikoni primerjave referenčnega izračuna ravni zvoka in izračunov z različnimi podatki o zvočni impedanci tal. Temna črta je linearna regresijska premica

Figure 83: A scatter plots of the reference noise calculation and calculations with different data on acoustic ground impedance. A linear fit line is represented in dark red.

Impedančna karta iz podatkov laserskega skeniranja ima zaradi razmeroma slabe tematske natančnosti na spremembe v izračunani ravni zvoka majhen vpliv, saj so slabo zajete kategorije, ki bi imele na spremembo največji vpliv, to so ceste in druge asfaltirane površine,

– večina jih je napačno vključenih v zvočno bolj mehke razrede. Impedančna karta, izdelana z objektno klasifikacijo ortofoto posnetkov dejansko stanje prikazuje najboljše, čeprav nekoliko precenjuje površino asfaltiranih in drugih zvočno trdih zemljišč. Nasproten primer je karta pokrovnosti oziroma rabe tal Corine, ki vsebuje veliko mešanih razredov in ima zato zelo posplošen vpliv, ki ne odraža nujno stanja na krajevni ravni. Standardni odklon in absolutni razpon razlik sta zato pri tem izračunu najmanjša.

Na rezultat ima velik vpliv izbira študijskega območja, saj bi bila tako standardni odklon, kot absolutni razpon razlik v drugačnih okoliščinah večja, na primer v bolj mestnem okolju, kjer je vse ozemlje pripisano kategoriji, ki zvoka ne slabi. Zvočna impedanca ima največji vpliv na širjenje zvoka na razdalji med 200 in 500 m (Van Maercke 2007, 46), vendar ima v preizkusnem izračunu večji vpliv največji delež pozidanih zemljišč ravno v teh pasovih oddaljenosti.



Slika 84: Raztreseni grafikoni primerjave referenčnega izračuna ravni zvoka ter izračunov z upoštevanimi lomnimi linijami reliefa in protihrupnimi pregradami. Temna črta je linearna regresijska premica

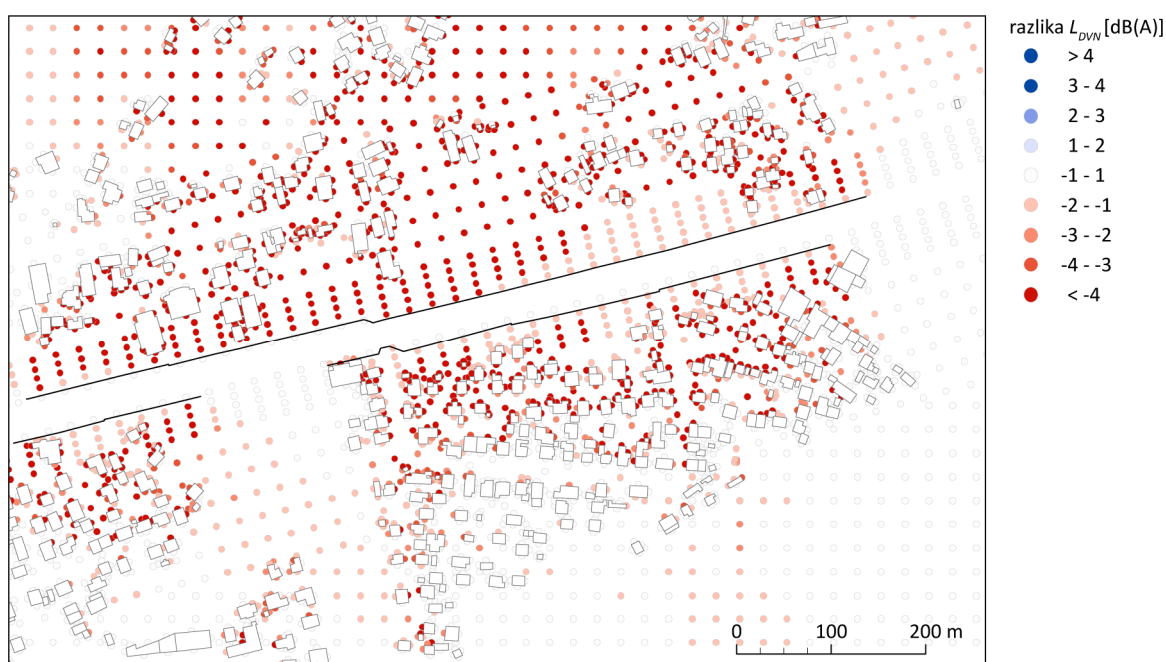
Figure 84: A scatter plots of the reference noise calculation and calculations considering relief break lines and noise barriers. A linear fit line is represented in dark red.

Na podlagi navedenega zaključujem, da je z vidika varstva pred hrupom kot osnovo za izračun impedančne karte najprimerneje uporabiti Karto dejanske rabe zemljišč MKGP, z vidika čim bolj točnega kartiranja hrupa pa zaradi pomanjkanja meritev v naravi klasifikacijo ortofoto posnetkov oziroma posnetkov visokoločljivih satelitov. Zaradi pomembnega vpliva na širjenje zvoka in pomanjkanja referenčnih podatkov je priporočljiva izvedba študije umerjanja »standardnih« oziroma najpogosteje uporabljenih kategorij rabe tal/pokrovnosti v Sloveniji s terenskimi meritvami upora tal za zvočni tok  $\sigma$  (angl. static air flow resistivity of material). Medletna spremenljivost pokrovnosti in lastnosti tal narekuje tudi ugotovitev



tipičnih vrednosti oziroma sprememb za značilne sezonske situacije na primer za zamrznjena tla in neolistan listnati gozd.

Kljub eksplicitni določitvi vpliva lomnih linij na zmanjšanje ravni zvoka v metodi NMPB, upoštevanje dodatnih lomnih linij reliefa na izračun glasnosti zvoka v okolju domala nima vpliva. Predvidevam, da zaradi velike ločljivosti modela reliefa in iz njega izračunanih plastnic (slika 84, levo), zato tudi ni opaznih razlik med izračunoma s protihrupnimi pregradami ter pregradami in lomnimi linijami.



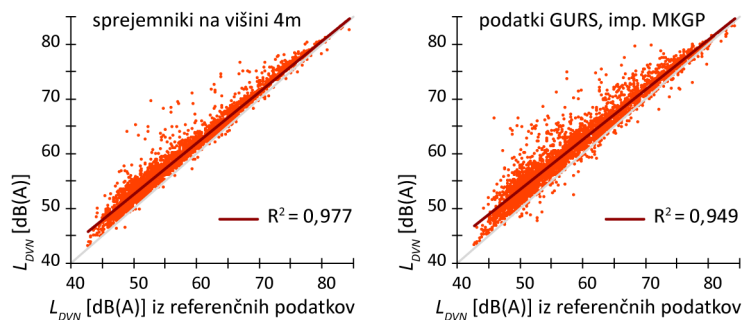
Slika 85: Karta razlik v ravni jakosti zvoka med referenčnim izračunom in izračunom z upoštevanimi protihrupnimi pregradami.

Figure 85: A map of noise differences in the reference calculation and a calculation considering noise barriers.

Učinek protihrupnih pregrad je velik in se manjša, ko se od njih oddaljujemo, zato je tudi razpršenost razlik manjša pri nižjih jakostih zvoka (slika 84, desno in slika 85). Vpliv je odvisen tudi od izoblikovanosti reliefa in prisotnosti drugih ovir na poti širjenja zvočnega valovanja, ki vplivajo na vidnost protihrupne pregrade v akustičnem smislu.

Sprememba višine sprejemnikov iz 2 na 4 m ima največji vpliv tam, kjer sprejemnik zaradi tega postane nezakrit, torej je neposredno na poti širjenja zvočnega valovanja (slika 86, levo). Najbolj je to izrazito za ovirami, na primer za stavbami, ki so nižje od 4 m. Izrazito povečanje ravni je prisotno tudi na območjih na prostem, ki ležijo za skupinami hiš, saj lahko na celotno skupino gledamo kot oviro za širjenje zvoka. Višja višina sprejemnika

pomeni manjšo relativno razliko v višini tovrstne ovire, zato jakost zvoka manj upade. Raven zvoka se lahko tudi zmanjša, kar se zgodi, če je sprejemnik pred oviro, nižjo od 4 m, saj prejme manj odbitega zvočnega valovanja s te ovire.



Slika 86: Raztreseni grafikoni primerjave referenčnega izračuna ravni zvoka in izračuna s sprejemniki na 4 m višine ter izračuna z upoštevanimi podatki GURS in MKGP. Temna črta je linearna regresijska premica

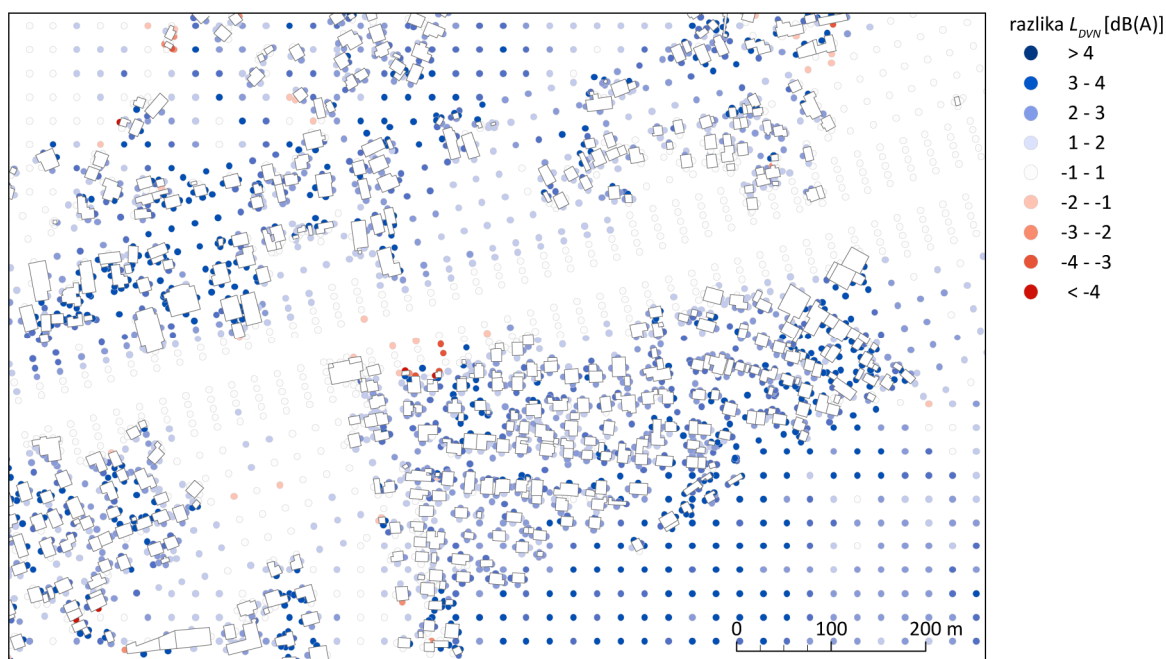
Figure 86: A scatter plots of the reference noise calculation and a calculation considering 4 m receivers height, and a calculation with GURS and MKGP data. A linear fit line is represented in dark red.

Izračun z uradnimi podatki, t.j. s podatki Geodetske uprave RS in impedanco tal izdelano iz Karte dejanske rabe zemljišč, je namenjen primerjavi ravni zvoka v okolju, kot jo lahko izračunamo brez dodatnega zbiranja podatkov.<sup>26</sup> Izračuni se od referenčnih najbolj razlikujejo, kar je razumljivo, saj so tudi uporabljeni najbolj raznoliki podatki. Spremembe se na nekaterih mestih izničujejo, drugod akumulirajo zato sta značilna razmeroma velik standardni odklon in absolutni razpon vrednosti. Zanimivo in pomembno je, da so spremembe v bližini cestišča razmeroma majhne, saj je na tem mestu tudi največja možnost za velike napake (slika 86, desno in slika 87). To pomeni, da so majhne tudi relativne višinske razlike med podatki, kar je posledica tega, da je bil DMV 12,5 izdelan s kombinacijo podatkov, ki so upoštevani v izračunu (višina baze hiš, višina cestišča in podobno). Na ožjih študijskih območjih pa je raven zvoka zaradi uporabe reliefa DMV 12,5 namesto lidarskega povsod podcenjena, večinoma zelo malo, na manjših površinah pa razlika lahko znaša do nekaj decibelov. Ocena ravni zvoka, za katero so skupno preseženi izračuni, ki temeljijo na podatkih GURS in v podobnem okolju, kot je ožje študijsko

<sup>26</sup> Pomemben pridržek so protihrupne pregrade, za katere ni centralne evidence in zato v izračunu niso bile upoštevane. Ostale podatke je treba pred umestitvijo v model izračuna ravni zvoka še ustrezno pripraviti.



območje O2 (bližina ceste, raznolika raba tal, velik del zemljišč s stavbami), je v povprečju med 1,7 in 3,4 dB, torej, kot da bi bilo upoštevan prometni tok, ki je za približno polovico do več kot enkrat večji od dejanskega. Največji krajevni vpliv imajo različne višine zgradb – kjer je njihova višina precenjena, je izračunana raven zvoka nižja od dejanske in obratno, – zato so na območjih, kjer so višine stavb precenjene (takšen primer je ožje študijsko območje O1), ravni zvoka podcenjene. Na nepozidanem ozemlju z velikim delom travnikov, njiv in/ali gozdov je razlika statistično nepomembna, vendar bo postala večja z uveljavitvijo enotne evropske metode izračuna ravni zvoka, saj razlikuje več impedančnih razredov z večjim učinkom na zmanjšanje ravni zvoka.



Slika 87: Karta razlik v ravni jakosti zvoka med referenčnim izračunom in izračunom s podatki GURS in upoštevano impedančno karto, izdelano iz karte rabe tal MKGP.

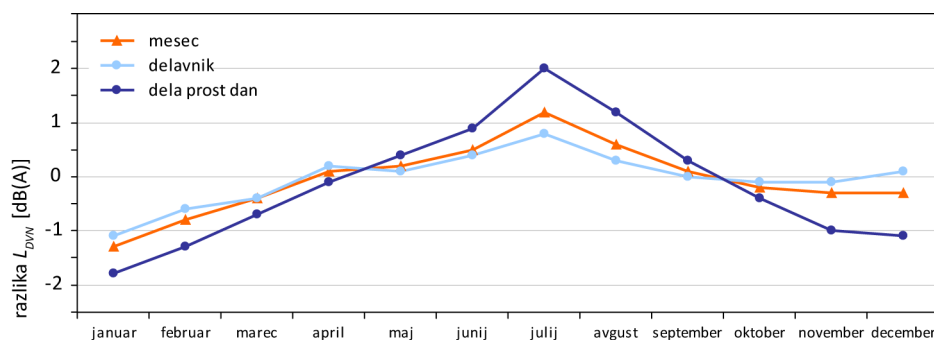
Figure 87: A map of noise differences in the reference calculation and a calculation with GURS data and considering the MKGP impedance map.

### 5.3 Izračunane ravni zvoka za celotno študijsko območje

Za oceno vpliva ravni zvoka na okolico je bilo treba opraviti še izračune za celotno študijsko območje. V izračunih ni bilo možno upoštevati dejanskih sezonskih oziroma mesečnih in dnevni podnebni nihanj oziroma tipičnih vremenskih stanj, prav tako zaradi odsotnosti referenčnih podatkov ali vsaj primerljivih študij nisem izdelal impedančne karte še, na

primer, za zimsko obdobje. Zato je spremenljivost ravni zvoka v okolju neposredno odvisna le od spremenljivosti v emisijah zvoka, torej od povprečne hitrosti in pretoka vozil.

Prostorsko in časovno spremenljivost sem ugotavljal s primerjavo izračunov vrednosti  $L_{DVN}$ ,  $L_{dan}$ ,  $L_{večer}$  in  $L_{noč}$  za vse sprejemnike na študijskem območju<sup>27</sup>. Izračunal sem letna povprečja za vsako izmed ravni zvoka po mesecih posebej za vse dni, delavnike in dela proste dni, po posameznih sprejemnikih. Nato sem izračunal razlike ravni zvoka od teh povprečij ponovno za vsak sprejemnik posebej. Na koncu sem iz razlik za posamezne sprejemnike po obdobjih izračunal povprečja in standardne odklone za vse sprejemnike. Standardni odkloni razlik med sprejemniki so majhni, tipično znašajo do nekaj desetink decibela (med 0 in 0,3 dB, povprečni standardni odklon je le 0,1 dB). Majhne razlike sprememb ravni zvoka med sprejemniki na različnih lokacijah za posamezno situacijo so posledica tega, da so spremenljive le zvočne emisije, ne spreminjajo pa se tudi pogoji širjenja zvoka.

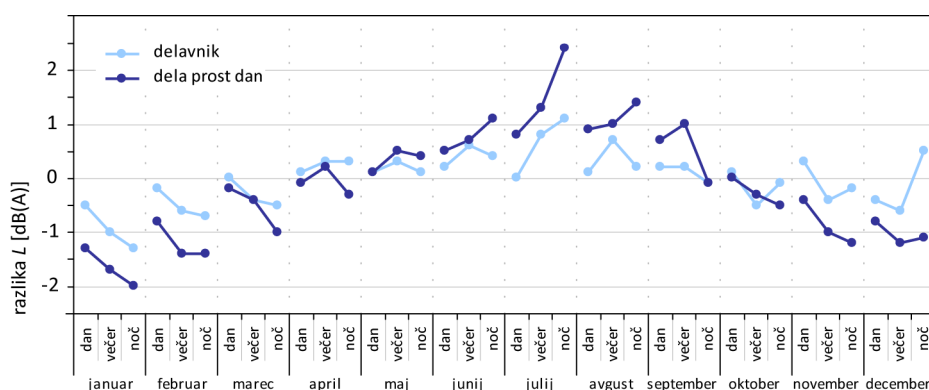


Slika 88: Grafikon povprečnih razlik ravni zvoka za posamezen mesec od letnega povprečja, za vse dni (oranžno), delavnike (svetlo modro) in dela proste dni (temno modro), za vse sprejemnike. Povprečne razlike se nanašajo na povprečja enakega obdobja, na primer, povprečne razlike dela prostih dni v januarju od dela prostih dni v letu. Grafikon torej prikazuje povprečno nihanje ravni zvoka čez leto za celotno študijsko območje.

Figure 88: Average monthly differences in noise levels from yearly averages for all days (orange), workdays (light blue) and work-free days (dark blue), for all the receivers. Average differences relate to averages of the same period, i.e. average differences for work-free days in January from yearly average of work-free days. The diagram therefore represents average fluctuation of sound power levels throughout the year for all the study area.

<sup>27</sup> 1810 sprejemnikov, izdelanih v različnih prostorskih mrežah in 16801 sprejemnik pred fasadami stavb. Skupaj 18613 sprejemnikov.

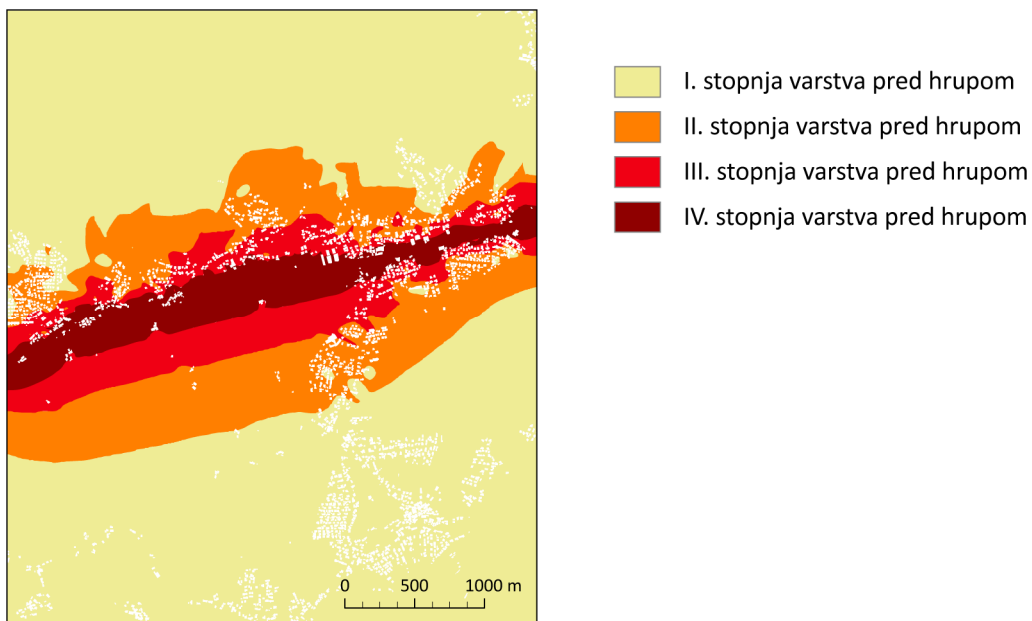
Nihanja so večja pri dela prostih dneh kot pri delavnikih, tako dnevna, kot sezonska (slika 88 in slika 89). Ravni zvoka so pri obeh kategorijah nadpovprečne v topli polovici leta (med aprilom in septembrom), meseci hladne polovice (od oktobra do marca) pa so tišji od povprečja. V povprečju je največja razlika pri dela prostih dnevih (večinoma so to konci tedna) v juliju, ki so od ostalih glasnejši za 2 dB, sledijo januarski prosti dnevi, ki so od drugih tišji v povprečju za 1,8 dB. Razpon pri delavnikih znaša med -1,1 dB v januarju in 0,8 dB v juliju.



Slika 89: Grafikon povprečnih razlik ravni zvoka od srednje vrednosti za posamezno obdobje dneva za delavnike in dela proste dni, po mesecih, za vse sprejemnike (celotno študijsko območje).

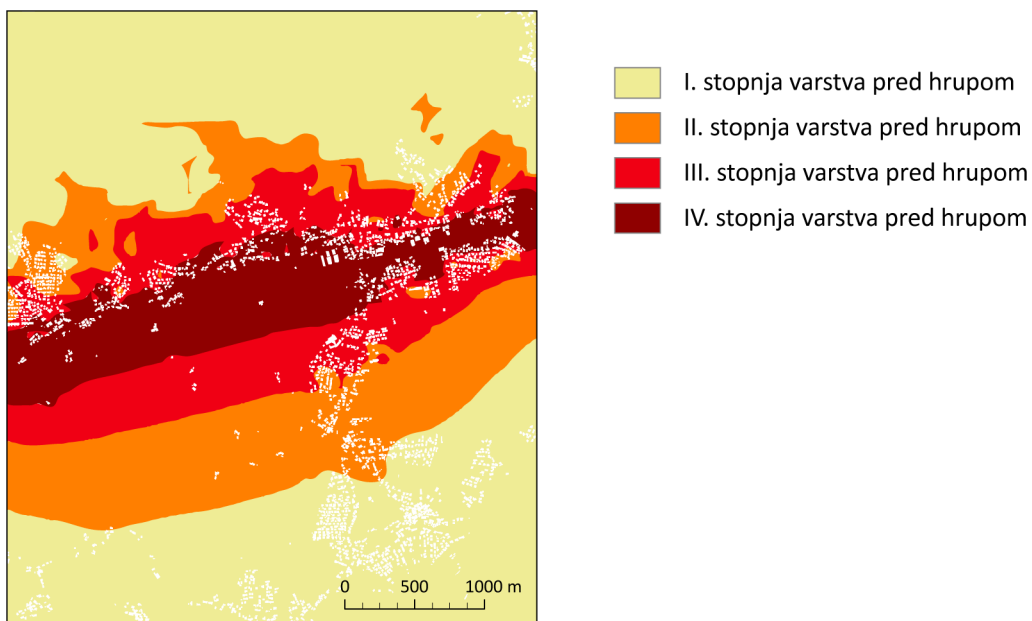
Figure 89: Average differences in sound power levels from a mean of individual day periods for workdays and work free days, in monthly slots and for all the receivers.

Analiza dnevnih nihanj ravni zvoka razkrije, da so tako pri delavnikih kot dela prostih dneh največje razlike ponoči, nato zvečer in najmanjše podnevi. Enako kot pri mesečnih povprečjih za ves dan, so največje negativne razlike januarja in pozitivne razlike v juliju za vsa obdobja dneva, razen za delavni dan podnevi, ko je julij povprečen, največja pozitivna razlika pa je v novembru. Največja razlika je med januarsko (-2 dB) in julijsko nočjo (2,4 dB) ob koncu tedna. Za boljšo ponazoritev razlike sem vrednosti ravni zvoka prikazal z izofonami kritičnih ravni zvoka za posamezne stopnje varstva pred hrupom (slika 90 in slika 91).



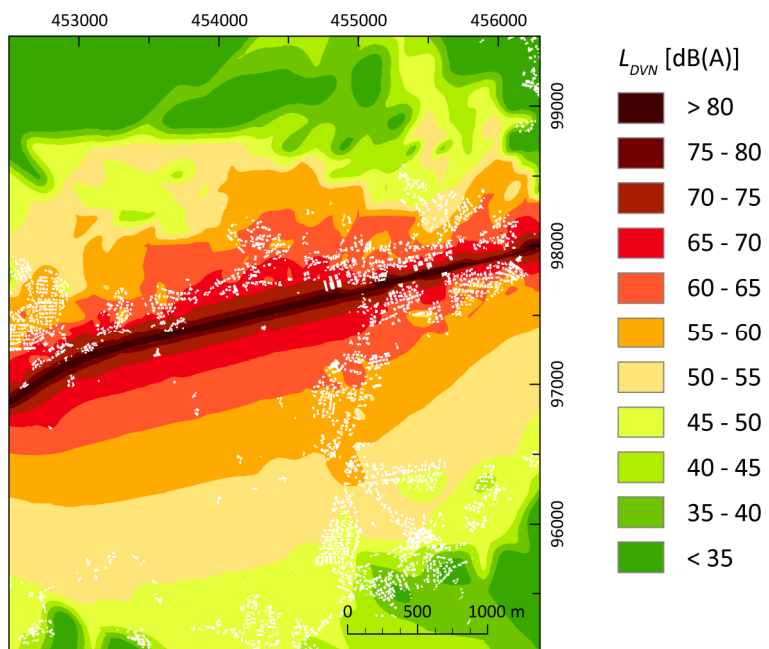
Slika 90: Karta kritičnih ravni jakosti zvoka v januarjskih dela prostih dneh, ponoči.

Figure 90: A noise map with exceeded critical noise limits in January work-free days at night.



Slika 91: Karta kritičnih ravni jakosti zvoka v julijskih dela prostih dneh, ponoči.

Figure 91: A noise map with exceeded critical noise limits in July work-free days at night.



Slika 92: Karta ravni glasnosti zvoka  $L_{DVN}$ .

Figure 92: A  $L_{DEN}$  noise map.

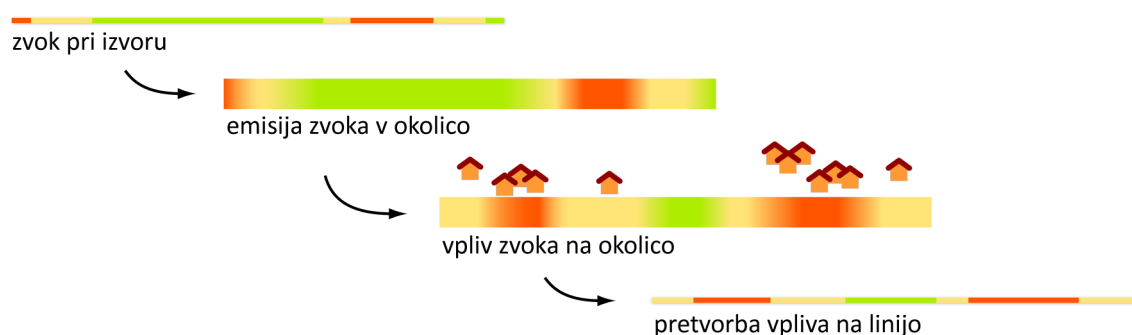


## 6 VPLIV HRUPA NA LJUDI IN PREOBLIKOVANJE PLOSKOVNIH PROSTORSKIH PODATKOV NA LINIJO

Za potrebe določevanja cestnine je treba (največkrat) zvezne ploskovne prostorske podatke o razširjenosti (imisijah) onesnaževalcev v okolju (zvočne ravni, koncentracije plinskih in prašnih onesnaževal in podobno) preoblikovati v prostorske kazalnike vplivov prometa na okolje in te projicirati (preoblikovati) nazaj na linijo (cesto), vir onesnaževanja. Gre torej za štiristopenjski proces (slika 93):

1. širjenje parametra v okolico (na primer zvoka, o tem je bilo govora v prejšnjih treh poglavjih),
2. vpliv parametra na okolico (na primer glede na kombiniranje različnih gostot in moči vpliva),
3. pretvorba ploskovnih podatkov vpliva nazaj na linijo in
4. določitev uteži za različne stopnje vpliva odsekov.

Pretvorba karte ravni zvoka v karto vpliva je potrebna, ker le vpliv in spremembe vpliva dejansko podajo »pomen«. Kjer so ravni zvoka najvišje, namreč niso nujno tudi najbolj moteče.



Slika 93: Poenostavljen prikaz procesa pridobitve razredov vpliva posameznih cestnih odsekov.

Figure 93: A simplified presentation of classification of road segments into impact classes.

Karte izpostavljenosti zvoku največkrat prikazujejo zvočne ravni brez ozira na to kje ljudje bivajo, delajo ali so kako drugače prizadeti, medtem ko so ravno ta območja najbolj zanimiva. Zato se kot dopolnilo kartiranju ravni zvoka uveljavlja tudi kartiranje njihovega vpliva, saj tovrstne karte podajajo pričakovano prizadetost ljudi na določeni lokaciji zaradi visokih ravni zvoka. V sledečih poglavjih zato najprej pojasnim osnove vpliva hrupa na ljudi, opredelim kriterije in metodo za rangiranje vplivov, pojasnim nekatere možnosti preoblikovanja tako dobljenih podatkov na linijo in na primeru analiziram spremenljivost cestnine.

## 6.1 Vpliv hrupa na ljudi

V mnogo državah je cestni promet glavni vir zvoka ter osrednja nadlega in moteč dejavnik (Bruel in Kjaer 2001).

Na kompleksnem področju dražljajev s človekom kot sprejemnikom, oceno vpliva hrupa<sup>28</sup> poleg razlik med posamezniki otežujejo še različni akustični in neakustični dejavniki. Med prve lahko štejemo raven zvoka, trajanje izpostavljenosti, frekvenčni spekter, impulzivnost in raven nihanja, medtem ko se med druge lahko uvrstimo dnevni čas, letni čas in pretekle izkušnje ter duševno in telesno stanje osebe. Z upoštevanjem socialnega in kulturnega okolja se področje dodatno zaplete (Alexandre et al. 1975; Relster 1975). Zaradi omenjenih dejavnikov je sistematična določitev razmerja med izmerjeno ravno zvoka in njegovimi učinki na ljudi zahtevna naloga. V širšem smislu lahko različne učinke hrupa na ljudi razdelimo v tri glavne skupine: psihološki, socialni in fiziološki.

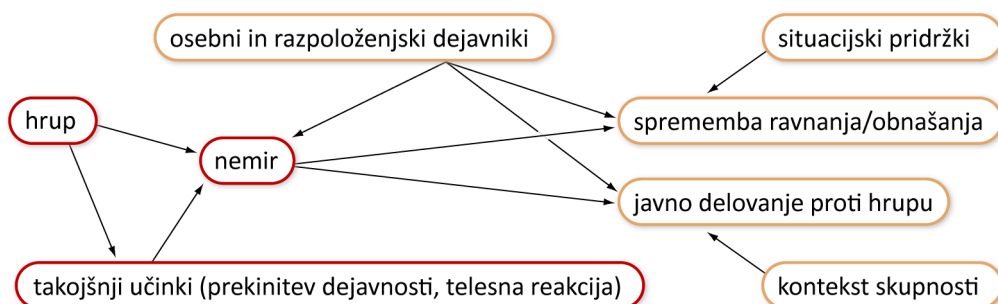
Posledice hrupa na ljudi se kažejo na primer v težavah s spanjem, večji razdražljivosti, zdravstvenih težavah (na primer prebavne motnje, visok krvni pritisk), motnjah relaksacije, težavah v sporazumevanju, zmanjšanem zadovoljstvu z življenjskimi pogoji itd. Poleg tega stres, ki nastane kot posledica hrupa, povzroča resno napetost v vsakodnevnem življenju in lahko prispeva k duševnim boleznim. Škoda, ki jo povzroča izpostavljenost previsokim

---

<sup>28</sup> V nadaljnjem besedilu s terminom hrup označujem neželen zvok oziroma moteče visoke ravni zvoka.



ravnem zvoka, vključuje visoke stroške preventive pred hrupom (zvočna izolacija), izgubo storilnosti (zaradi nezmožnosti koncentracije, težav v komuniciranju ali izčrpanosti zaradi pomanjkanja spanja) in stroške zdravstva. Čeprav se ljudje prilagodijo hrupu tako, da se zanj namenoma ne zmenijo, uho še vedno pošilja signale živčnemu sistemu, ki spodbuja reakcijo telesa. Nemir (angl. annoyance), ki ga večina ljudi občuti ob izpostavljenosti hrupu, je najpogostejši zunanji simptom notranjega stresa (Berglund in Lindvall 1995).



Slika 94: Poenostavljen model povezave med hrupom in njegovim vplivom v skupnosti (Nelson 1987, cit. po Ouis 2001, 109).

Figure 94: A simplified model relating noise and its effects in community (Nelson 1987, cit. from Ouis 2001, 109).

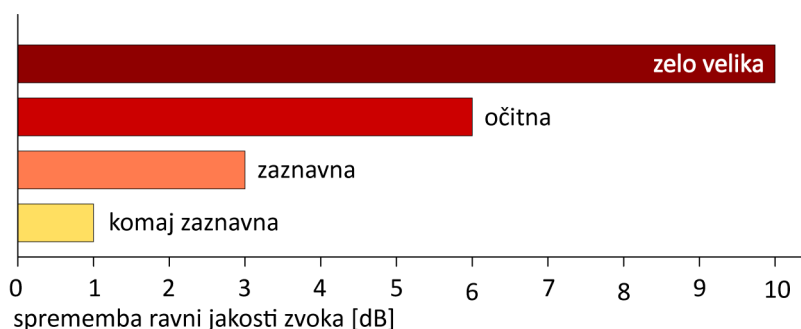
Iz zgornje slike je razvidno, da se lahko oseba, ki se ukvarja z neko dejavnostjo, odzove na hrup takoj (z odvratitvijo od dejavnosti ali silovito reakcijo zaradi intenzivnega hrupa) ali bolj nevpadljivo v obliki nemira. Nemir je, v splošnem, opredeljen kot občutek nelagodja, ki naj bi negativno vplival na posameznika ali skupino. Takšna definicija nemir loči od ostalih subjektivnih reakcij na hrup. Utemeljitev lahko poiščemo v tem, da ocenjevanje hrupnosti zaradi spremembe ravni zvoka vsebuje dve sestavini. Prva je spoznavna in zadeva pričakovanje, da naj bi zvok ustrezal nekim lastnostim idealnega okolja, medtem ko je druga povsem čustvena in je povezana s spremembo razpoloženja prizadete osebe zaradi hrupa<sup>29</sup>.

<sup>29</sup> Subjektivna zaznava zvoka prav tako pomeni, da mora biti znižanje ravni zvoka občutno, preden slišimo razliko. Na primer, prepolovitev akustične moči vira zvoka pomeni zmanjšanje ravni hrupa za le 3 dB, kar je za »povprečnega« človeka komaj zaznavno (Ouis 2001, 101). Tudi zaradi tega se je uveljavilo razlikovanje po stopnjah ravni po 5 dB, saj je v tem primeru razlike mogoče dobro ločiti, prav tako pa občutimo, da se je »hrup podvojil«, če se poveča za 10 dB (Brueel in Kjaer 2001, 9).

Merjenje stopnje nemira zaradi prometnega hrupa običajno poteka v obliki anketiranja, pri čemer je zelo pomembno, kako so oblikovana vprašanja. Na podlagi rezultatov številnih podobnih raziskav in njihovih baz podatkov so študije povezanosti stopnje nemira z ravnmi zvoka privedle do oblikovanja enačb, ki to stopnjo opisujejo. Na primer, delež ljudi ( $P$ ), za katere je hrup zelo nadležen (visoka stopnja nemira), lahko izračunamo iz povprečne dnevno-nočne ravni hrupa  $L_{DN}$  po naslednji empirični enačbi (Finegold et al. 1994):

$$P = \frac{100}{1 + e^{(11,13-0,14 \cdot L_{DN})}} \quad (20)$$

Klæboe (2007, 571-572) je na podlagi obsežnih anketiranj prebivalcev Osla ugotavljal zvezo med ravnmi zvoka na fasadah objektov in v sosesčini ter stopnjo motnje. Odkril je, da za vsak decibel višja raven zvoka na fasadi ( $L_{DVN}$ ) zviša verjetnost poročanja višje ravni motenja pri posamezni osebi za 16 %, ko je ta oseba pred stavbo, in za 14 %, ko je oseba v stanovanju (glej tudi poglavje 5.3).



Slika 95: Posplošen prikaz človekove zaznavnosti spremembe v ravni jakosti zvoka (Bruel in Kjaer 2001, 9).

Figure 95: A simplified representation of human sensibility to changes in sound level (Bruel and Kjaer 2001, 9).

Vendar novejšje študije poudarjajo, da spremenljivke, kot sta pretekle izkušnje in odnos do vira zvoka, pojasnijo več spremenljivosti reakcij na hrup, kot sama izpostavljenost hrupu (Ouis 2001, 112). Stansfeld et al. (1993) utemeljujejo opažanja, da so na hrup občutljivi ljudje bolj nagnjeni k nemiru zaradi prometnega hrupa od ostalih, kar podpira študijo v kateri sta Raw in Griffiths (1988) ugotovila, da je občutljivost na hrup najpomembnejša posamična značilnost za napovedovanje nezadovoljstva zaradi hrupa. V isti študiji avtorja ugotovita, da je občutljivost na hrup neodvisna od ravni hrupa. Na hrup bolj občutljivi ljudje občutijo več nadležnih vplivov nočnega prometnega hrupa, kot manj občutljivi (Stansfeld et al. 1993; Öhrström 1995). Polič (1995) ugotavlja, da so ljudje, ki so živeli v zelo tihem vaškem

okolju, lahko bolj občutljivi na zvok kot meščani, Thiessen (1978) pa ljudem v starostnih skupinah med 25 in 55 let pripisuje za 15 dB manjšo občutljivost kot mlajšim in starejšim.

## 6.2 Kartiranje vpliva hrupa

V najbolj osnovni obliki lahko kartiranje vpliva hrupa dosežemo s kombiniranjem razmerja med izpostavljenostjo in odzivom ter kazalnikov izpostavljenosti ravnem zvoka (za posamezne stanovanjske stavbe ali prostorsko, če proučujemo na primer vpliv na dejavnosti na prostem). Za ocenjevan vpliv lahko izračunamo na primer deleže kategorij ljudi, ki jih hrup zelo moti, moti in ne moti ali pa kazalnik povprečnega nemira. Kartiranje vpliva hrupa pomeni spremembo paradigme in olajšuje prikaz sestavljenih kazalnikov in kazalnikov višjega reda. Tovrstni indikatorji lahko na primer združujejo vplive nemira in motenj spanca, upoštevajo občutljivost določene populacije in predstavijo karte stroškov izpostavljenosti določenim ravnem zvoka (Klæboe et al. 2006, 621). Že v prejšnjem poglavju je navedeno, da je vpliv ravni zvoka odvisen od številnih socioloških, kulturnih in drugih dejavnikov ter zato krajevno spremenljiv. Za natančno ugotavljanje vpliva hrupa na določenem območju je zato običajno treba izvesti obsežno anketiranje. Ker je le-to zahtevno opravilo, zlasti če gre za ocenjevanje vpliva na ravni večjih območij (na primer države), hkrati pa ne obstaja enotna metoda, so se ravni zvoka uveljavile kot osnovno merilo ocenjevanja potencialnih težav povezanih z emisijami zvoka prometa, tako v Sloveniji, kot drugod po svetu. Špes et al. (2002, 7) navajajo naslednja splošno veljavna pravila, ki so se oblikovala na podlagi raziskav odzivnosti širše populacije na hrup v okolju:

- pri hrupu v rezidenčnih okoljih na prostem podnevi do 55 dB(A) in ponoči do 45 dB(A) ljudje sprejemajo okolje kot udobno,
- ravni v rezidenčnih okoljih na prostem od 55 dB(A) do 60 dB(A) podnevi in 45 do 50 dB(A) ponoči ljudje še sprejmejo brez večjih pritožb,
- ravni v rezidenčnih okoljih na prostem podnevi od 60 do 65 dB(A) štejejo kot moteče, vendar jih še nekako dopuščajo, in
- območja v rezidenčnem okolju na prostem z ravnmi nad 65 dB(A) so kritična območja, kjer je ogroženo zdravje in kjer je potrebno ukrepati.

Privzeti kriteriji se nanašajo na »povprečno odzivnost« večjega števila ljudi. Zato je še vedno mogoče, da je kljub njihovem izpolnjevanju, določena skupina ljudi pomembno motena in nezadovoljna. Spodnja preglednica navaja mejne in kritične vrednosti kazalnikov hrupa  $L_{DVN}$  in  $L_{noč}$ , kot veljajo v Sloveniji po Uredbi o mejnih vrednostih kazalnikov hrupa v okolju (UL RS 105/2005, 11030) za posamezne stopnje varstva pred hrupom. Stopnje varstva pred hrupom so opredeljene kot stopnje zmanjševanja onesnaževanja okolja s hrupom in so določene za posamezne površine glede na občutljivost za škodljive učinke visokih ravni zvoka (UL RS 105/2005, 11026; preglednica 28).

Preglednica 28: Mejne in kritične vrednosti kazalnikov hrupa  $L_{noč}$  in  $L_{DVN}$  za posamezne stopnje varstva pred hrupom. (UL RS 105/2005).

Table 28:  $L_{night}$  and  $L_{DEN}$  noise limits for the different degrees of protection against noise (UL RS 105/2005, 11030).

stopnje varstva pred hrupom		mejna vrednost [dB(A)]		kritična vrednost [dB(A)]	
		$L_{noč}$	$L_{DVN}$	$L_{noč}$	$L_{DVN}$
I. stopnja	mirna območja na prostem, t.j. zavarovana območja v skladu s predpisi s področja ohranjanja narave, razen območij naselij na zavarovanem območju ter območij cest in železniških prog v širini 1000 m od sredine pomembne ceste ali železniške proge	40	50	47	57
II. stopnja	neposredna okolica bolnišnic, zdravilišč in okrevališč, čista stanovanjska območja, stanovanjske površine za posebne namene in površine počitniških hiš ter območja namenjena turizmu	45	55	53	63
III. stopnja	splošne stanovanjske površine in stanovanjske površine s kmetijskimi gospodarstvi, površine za vzgojo, izobraževanje, šport, zdravstvo, kulturo, javno upravo in opravljanje verskih obredov, območja namenjena rekreaciji in športu, parki, pokopališča, mešana območja in vodna zemljišča	50	60	59	69
IV. stopnja	nakupovalna središča, sejmišča, zabavišni objekti in podobno, območja proizvodnih dejavnosti, prometna, komunikacijska, energetska, okoljska in vodna infrastruktura, površine namenjene izkoriščanju mineralnih surovin, kmetijska in gozdna zemljišča ter območja za potrebe obrambe	65	75	80	80

Ker ugotavljanje občutljivosti populacije na ravni zvoka in kartiranje območij stopenj varstva pred hrupom ne sodita v okvir te naloge, sem kot kriterij vpliva uporabil mejne in kritične vrednosti za tretjo stopnjo varstva pred hrupom ter poseljenost. Zato tudi nisem upošteval stavb splošnega družbenega pomena, čeprav bi bilo to smiselno. Upošteval sem torej naseljene stavbe in dejanske ravni jakosti zvoka na najbolj izpostavljeni fasadi.

### 6.3 Preoblikovanje ploskovnih prostorskih podatkov na linijo

Področje preoblikovanja zveznih prostorskih podatkov na linijo je še razmeroma neraziskano in za področje cestninjenja v literaturi po mojem vedenju še ni bilo izpostavljeno. Zato v nadaljevanju podajam okvir, ki naj služi nadaljnjim raziskavam. Za spremembo tovrstnega prostorskega okvira sta bila v arheoloških raziskavah uporabljena pristopa segmentacije in kartografske transformacije, prirejena za modeliranje pojavov, ki jih želimo pripisati liniji (Mordant 2006). Pri tem linijo poenostavimo, razdelimo na odseke ter ji z geometričnimi metodami pripišemo vrednosti spremenljivk. Za transformacije vrednosti lahko uporabimo enostavne metode, na primer evklidsko razdaljo, lahko pa kombiniramo več metod z upoštevanjem dejavnikov okolja (izoblikovanost reliefa, rabo tal in podobno) in smeri vpliva. V primeru ugotavljanja širjenja zvoka in njegovega vpliva so okoljske spremenljivke že upoštewane. Ostaja torej vprašanje delitve cestninske ceste na odseke, kar lahko storimo z diskretizacijo zveznega prostora. Diskretizacija zvezne prostorske spremenljivke je lahko enotna, to je neodvisna od prostorske entitete, ki jo modelira (na primer prekritje zveznega dvorazsežnega polja s kvadratno mrežo), ali od nje odvisna (na primer tematski sloj). V preprostem primeru tematski sloj tvori niz poligonov, kjer vsak poligon zavzema neko ozemlje in ima enako vrednost za določen atribut (Shekhar et al. 1997, 105). Nato nosilce informacije transformiramo (posplošimo na geometrijske oblike z manj razsežnostmi – linije ali točke) in prenesemo na linijo (cesto). Linijo lahko nato razdelimo z razvrščanjem v razrede vpliva. Drugi pristop je predhodna delitev linije na dolžinske odseke in naknadno ugotavljanje vpliva ter razvrščanje v razrede. Prvi način da lahko manj posplošene rezultate in je zlasti primeren pri ugotavljanju »vročih točk«, drugi pa je bolj primeren pri ugotavljanju vplivov različnih parametrov. Ker se preveliki posplošenosti lahko izognemo z izbiro dovolj kratkih cestnih odsekov, sem se odločil za drugi pristop.

Vpliv na okolje (na primer za določeno naseljeno stavbo, površinsko celico, sprejemnik) je mogoče pripisati le enemu dolžinskemu odseku ceste ali pa ga obteženo razdeliti na sosednje odseke na določeni razdalji vpliva, kar je ustrežnejše pri kombiniranju vplivov na različne kategorije (na primer prebivalstvo, zdravstvene ustanove, rekreacijske površine), kot tudi pri krajših dolžinskih odsekih, na primer na koncu cestninskih odsekov (ob uvozih na oziroma izvozih s cestninske ceste). Prvi primer je razmeroma enostaven, saj ga lahko poenostavimo

na ugotavljanje najmanjše evklidske razdalje med cestnimi odseki in na primer stavbami (ali njihovimi središčnimi točkami). Vpliv (število prebivalcev, ki imajo presežene mejne in/ali kritične vrednosti) v celoti pripišemo odseku, ki je stavbi najbližje. Pri razporejanju vpliva med več odseki izpostavljam tri metode:

- linearno,
- obratno vrednost kvadrata razdalje in
- modificirano obratno vrednost kvadrata razdalje.

Vse temeljijo na ugotavljanju razdalje pri kateri jakost zvoka ob danih zvočnih emisijah pade na določeno raven (na primer mejno ali kritično). Ta razdalja ponazarja vplivno območje določenega odseka. Zanima nas na primer razdalja pri kateri raven zvoka pade na nočno mejno raven za območja tretje stopnje varstva pred hrupom, če veljajo pogoji širjenja zvoka brez geometričnih ovir in upadanja jakosti zaradi vpliva tal, pri emisijah, ki veljajo na določenem kilometrskem odseku, ob delavnikih, ponoči. Upadanje ravni zvoka linijskega vira z razdaljo se poenostavljeno izračuna z enačbo:

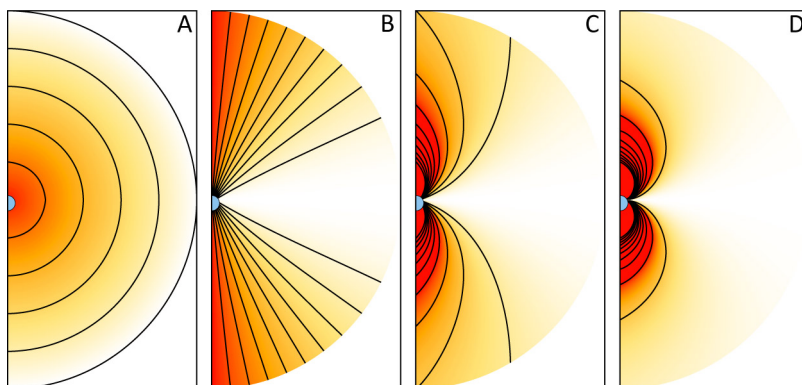
$$L_d = L_{W,linija} - 10 \cdot \log(4\pi \cdot d), \quad (21)$$

kjer je  $L_d$  raven zvoka na oddaljenosti  $d$  in  $L_{W,linija}$  raven zvoka linijskega vira. Razdaljo torej izračunamo:

$$d = 10^{\frac{L_{W,linija} - L_d}{10}} / 4\pi. \quad (22)$$

Zaradi upoštevanja ugodnih razmer za širjenje zvoka čez akustično trde površine Van Maercke (2007, 133) priporoča popravek jakosti vira +6 dB, kar pomeni, da v tovrstnih razmerah razdaljo  $d$  pomnožimo s faktorjem 3. Razdalje izračunamo za posamezne odseke in nato glede na izračunano razdaljo ugotavljamo pripadnost objektov (na primer naseljenih stavb, sprejemnikov (točk vzorčenja)) tem odsekom. Zatem lahko obtežimo vpliv na primer linearno, to je, če je določena stavba v vplivnem območju dveh odsekov, lahko vsakemu pripišemo delež števila prebivalcev stavbe obteženo glede na razmerje med obratnima oddaljenostma stavbe do odsekov. Ker jakost zvoka z razdaljo ne upada linearno, lahko to upoštevamo tudi pri pripisovanju vpliva in upoštevamo na primer razmerje med obratnima vrednostma kvadrata razdalje. Naprednejši način, uporaben zlasti pri preoblikovanju zveznih, na primer rastrskih podatkov, lahko upošteva še kot med pravokotnico na cestni

odsek v vodoravni smeri in sprejemnikom ( $\alpha_o$ ). Uteži za odseke za posamezen sprejemnik izračunamo tako, da primerjamo rezultate zmnožka obratne vrednosti razdalje (ali kvadrata razdalje) med sprejemnikom in odsekom ter vrednostjo, ki jo dobimo, če sinus kota  $\alpha_o$  odštejemo od 1 (slika 96). Na ta način je vpliv v večji meri pripisan ustreznemu delu cestnega odseka, vendar je treba pri načinu z upoštevanjem kota zaradi vijuganja ceste uporabiti krajše cestne odseke (na primer namesto kilometrskih, 200 m odseke) ter tako izračunane vplive sešteti.



Slika 96: Linearno pojemanje vpliva dolžinskega cestnega odseka z oddaljenostjo od krajne točke odseka, ki jo ponazarja modra pika (odsek, katerega vpliv proučujemo, poteka naravnost, levo od točke) (A) ter pojemanje vpliva glede na kot med pravokotnico na cestišče in točko v prostoru ( $1 - \sin \alpha_o$ ) (B). Kombinacija pojemanja vpliva določenega odseka, kot funkcija razdalje in sinusa kota (C), ter kvadrata razdalje in sinusa kota (D).

Figure 96: Linear diminishing of impact of a selected road segment with distance from the end point of the segment, represented by an orange dot (the segment under consideration extends straight to the left of the dot) (A). Diminishing of impact regarding the angle between the line perpendicular to the road segment, extending from the end dot, and a point in the buffer area ( $1 - \sin \alpha$ ) (B). A combination of impact diminishing as a function of distance and angle (C) and squared distance and angle (D).

Vpliv posameznega kilometrskega odseka na okolico sem ugotavljal tako, da sem preštel naseljene stavbe in število prebivalcev, ki posameznemu odseku »pripadajo« glede na najbližjo oddaljenost in so v pasu ravni zvoka s preseženimi mejnimi in kritičnimi vrednostmi za tretjo stopnjo varstva pred hrupom. Na študijskem območju so trije kilometrski odseki, vendar je četrti le nekaj metrov krajši (dolg je 996 m) zato sem ga v analizi vseeno upošteval.

Z vidika varstva pred hrupom in vpliva posameznega odseka na okolico se postavlja vprašanje kako vrednotiti količinski rezultat (preglednica 29).

Preglednica 29: Število stavb, naseljenih stavb in prebivalcev glede na presežene mejne in kritične vrednosti ravni zvoka za tretjo stopnjo varstva pred hrupom, za različna obdobja po kilometrskih odsekih. A, B, C in D prikazuje slika 97.

Table 29: The number of buildings, inhabited buildings and people affected by limit and critical sound levels according to different time periods and kilometre road segments.

raven zvoka	1. odsek		2. odsek		3. odsek		4. odsek	
	mejna	kritična	mejna	kritična	mejna	kritična	mejna	kritična
št. vseh stavb								
celoletni $L_{DVN}$	388	53	506	85	210	59	293	75
celoletni $L_{noč}$	471	115	613	173	228	109	412	113
dela prost dan januar $L_{noč}$	408	60	528	95	212	69	319	81
dela prost dan julij $L_{noč}$	498	206	711	313	237	145	455	160
št. naseljenih stavb								
A celoletni $L_{DVN}$	194	24	241	32	110	26	162	30
B celoletni $L_{noč}$	248	55	292	68	116	60	240	54
C dela prost dan januar $L_{noč}$	208	28	250	35	111	32	182	32
D dela prost dan julij $L_{noč}$	264	98	332	144	119	73	266	83
št. prebivalcev								
celoletni $L_{DVN}$	820	100	994	143	471	131	613	103
celoletni $L_{noč}$	1017	255	1252	290	489	276	903	200
dela prost dan januar $L_{noč}$	867	112	1038	158	472	157	698	108
dela prost dan julij $L_{noč}$	1085	423	1415	610	505	313	988	320

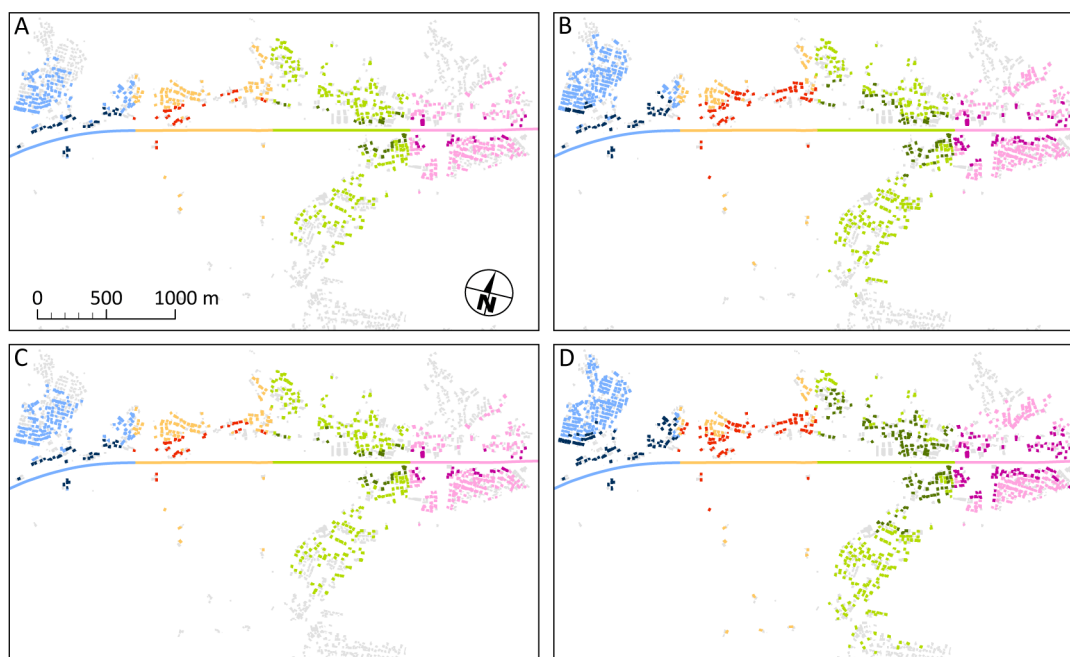
Vplivi posameznih kilometrskih odsekov se spreminjajo od najmanjšega (»ničnega«) za določen parameter, na primer hrup, do največjega, ki je odvisen od družbenih in naravnih lastnosti regije, čez katero odsek poteka. Uteži za izračunavanje cestnine niso opredeljene zvezno, temveč po razredih vplivov, recimo treh.

1. razred: ničen vpliv (mejne ravni zvoka za predpisana območja varstva pred hrupom niso presežene),
2. razred: majhen vpliv (presežene so mejne ravni zvoka) in
3. razred: velik vpliv (presežene so kritične ravni zvoka).

Seveda se postavlja vprašanje, kje postaviti mejo med posameznimi razredi. To še ni opredeljeno, moja razmišljanja pa so sledeča. Določimo jo na primer na podlagi najvišje ravni varovanja pred škodljivimi učinki, to je, če ima preseženo mejno ali kritično raven že ena stanovanjska stavba ali en prebivalec. Lahko pa »tolerančni prag« dvignemo in določimo, da mora imeti mejne in kritične vrednosti presežene večja skupina ljudi ter, da določen odsek sodi v tretji razred vpliva tudi, če je preseženo večje število ljudi, ki so



izpostavljeni prekoračeni mejni ravni zvoka. Števila so lahko različna za mejno in kritično raven. Na mejo med razredi lahko poleg samega števila prizadetega prebivalstva vplivajo tudi drugi dejavniki, na primer upoštevanje bližine vrtcev in izobraževalnih ustanov, knjižnic, muzejev, stavb za zdravstveno varstvo (bolnišnice, zdravstveni domovi), domov za starejše občane, območij za rekreacijo in območij zavarovane narave. Kolikšna so ta števila, katere dejavnike kombinirati in kakšna so razmerja med razredi z vidika cestnine bo treba določiti v posebni študiji.



Slika 97: Naseljene stavbe s preseženimi mejnimi (svetlejši odtenki) in kritičnimi vrednostmi (temnejši odtenki), po odsekih, glede na celoletni kazalnik glasnosti zvoka  $L_{DEN}$  (A), celoletni kazalnik glasnosti zvoka  $L_{noč}$  (B), nočno raven zvoka v dela prostih dneh januarja (C) in julija (D). Nenaseljene stavbe in stavbe, na katerih mejne ravni niso presežene, so prikazane svetlo sivo.

Figure 97: Inhabited buildings with exceeded noise limits (light shades) and critical noise limits (dark shades), by road segments according to yearly  $L_{DEN}$  (A), yearly  $L_{night}$  (B),  $L_{night}$  in January (C) and July (D) work-free days. Uninhabited buildings and buildings where noise limits are not reached are displayed in light gray.

Razporeditev dolžinskih odsekov v razrede je odvisna tako od prostora, kot časa. Posamezen odsek je zato v različnih obdobjih dneva in leta lahko v različnih razredih vpliva, kar ima posledično učinek na različno višino cestnine za ta odsek. Preglednica 29 in slika 97 prikazujeta spreminjanje števila prizadetih naseljenih stavb za kilometrske odseke ob upoštevanju različnih časovnih obdobj. Opaziti je, da je preseženim mejnim in kritičnim vrednostim jakosti zvoka izpostavljenih več sto ljudi na vseh preučevanih cestnih odsekih,

gre namreč za enega najbolj obremenjenih cestnih odsekov v državi. Razmere so slabše ponoči, kot ob upoštevanju celodnevnih ravni zvoka in mejnih vrednosti. Glede na časovno spremenljivost je pri nočnih vrednostih v dela prostih dneh v januarju in juliju na študijskem območju opaziti večjo razliko v številu prebivalcev izpostavljenem kritičnim ravnem, kot mejnim ravnem. Število ljudi, izpostavljenih mejnim ravnem, je glede na celoletno nočno povprečje ob dela prostih dneh januarja v povprečju manjše za 15 % in julija za 10 % večje, pri kritičnih ravneh pa januarja manjše za 50 % in julija večje za 60 %.

Cestnino za cestninske odseke (na primer Brezovica-Vrhnika, Vrhnika-Logatec), z vidika določenega parametra (na primer hrupa), izračunamo s seštetjem izračunanih cestnin za ustrezne dolžinske odseke.

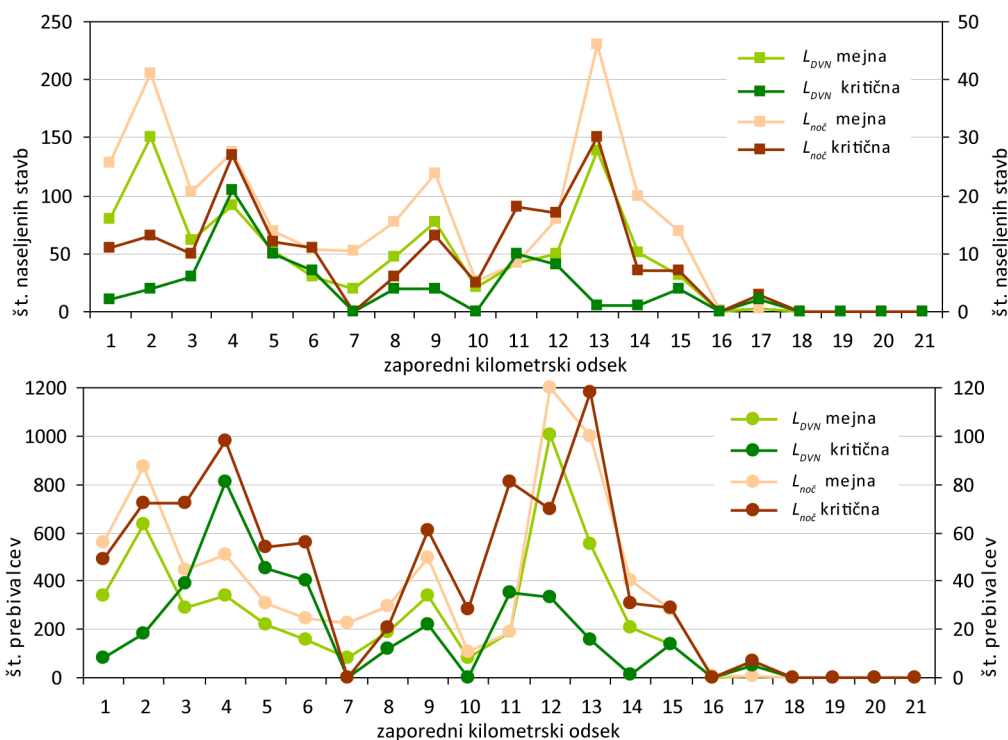
Ker je mejnim in kritičnim ravnem zvoka na študijskem območju izpostavljenih tako veliko ljudi, sem metodo preizkusil še na daljšem odseku. Ker bi bil lasten izračun ravni zvoka prezamuden, sem uporabil strateško karto hrupa za avtocestni odsek med Brezovico in Logatcem.

#### 6.4 Študija na primeru strateške karte hrupa na odseku med Brezovico in Logatcem

Strateške karte hrupa dajejo osnovni pregled obstoječe obremenitve okolja s hrupom oziroma oceno izpostavljenosti hrupu na posameznem območju zaradi različnih virov hrupa. Na osnovi emisij posameznih virov hrupa lahko posledično ocenimo tudi celotno obremenitev okolja s hrupom za določeno območje (Direktiva 2002/49/ES). Strateško kartiranje hrupa se uporablja za zbiranje informacij za Evropsko komisijo in občane ter kot izhodišče za akcijske načrte varstva pred hrupom. Vsaka od teh uporab zahteva drugačen tip strateške karte hrupa.

Skladno z direktivo o hrupu je morala tudi Slovenija izdelati strateške karte hrupa, kar je izpolnila leta 2008. Karte hrupa za glavne ceste so z metodo NMPB izračunane za tiste cestne odseke, ki so imeli v letu 2006 več kot 6 milijonov prevozov vozil. Sprejemniki so postavljeni v 10 m kvadratni mreži, do približno 1100 m na vsako stran od središnice ceste. Izračun je narejen za celoletni  $L_{DVN}$  in  $L_{noč}$ .

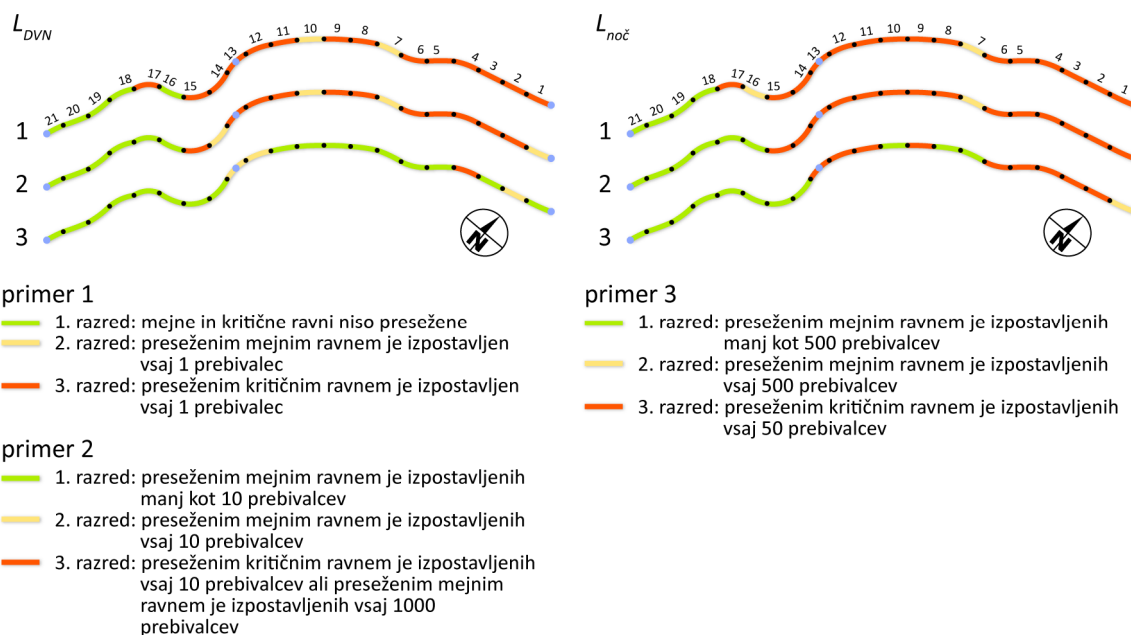




Slika 98: Grafikona števila naseljenih stavb (zgoraj) in njihovih prebivalcev (spodaj), ki so izpostavljeni mejnim in kritičnim ravnom zvoka po kilometrskih odsekih, za avtocestni odsek med Brezovico in Logatecem. Levo merilo velja z mejne, desno pa za kritične vrednosti.

Figure 98: Diagrams of the number of inhabited building (upper) and their residents (lower) that are exposed to exceeded noise levels by kilometre road segments for highway section between Brezovica and Logatec. Left scale is for limit values and the right scale is for critical values.

Glede na to, kje določimo mejo med posameznimi razredi, lahko dolžinske segmente na cestnem odseku med Brezovico in Logatecem razvrstimo v tri razrede vpliva na okolico (vpliva na višino cestnine z vidika parametra hrup) kot prikazuje slika 99.



Slika 99: Trije primeri razvrstitve dolžinskih odsekov cestninske ceste med Brezovico in Logatec v razrede vpliva na okolico in posledično vpliva na višino cestnine z vidika parametra hrup. Gre za enega najbolj prometno obremenjenih cestnih odsekov v državi. Modre točke označujejo priključke na avtocesto.

Figure 99: Three classification examples of road segments between Brezovica and Logatec into classes of impact on the environment (and consequently effect on the height of the toll) regarding the noise parameter. It is one of the busiest road segments in Slovenia. Blue dots are highway entry points.



## 7 ZAKLJUČEK

Namen raziskave je bil preveriti in ovrednotiti smiselnost uporabe daljinskega zaznavanja pri določevanju in spremljanju okoljskih spremenljivk, potrebnih pri modelu prostorsko in časovno spremenljive cestnine. Delo je obsegalo opredelitev dejavnikov in njihovih kazalnikov, ki jih je mogoče spremljati z daljinskim zaznavanjem, analizo metod določevanja kazalnikov, analizo širjenja onesnaževalca (konkretno zvoka) v prostor, analizo vpliva, preoblikovanje prostorskega vpliva nazaj na linijo vira (cesto) in razvrščanje cestnih odsekov v razrede vpliva.

Ob tem sem postavil hipotezi, »da lahko z ustrezno izbiro platform in senzorjev ter določitvijo najustreznejših metod daljinskega zaznavanja optimalno zbiramo in modeliramo podatke izbranih okoljskih spremenljivk, ki so potrebne za kakovosten izračun dinamično spremenljive cestnine« ter, »da lahko s prilagoditvijo in izboljšanjem obstoječih metod ter z njihovo kombinacijo znatno izboljšamo rezultate«, ki ju na podlagi interdisciplinarne povezave raziskav različnih področij, nove kombinacije obstoječih pristopov in številnih manjših primerjalnih študij potrjujem.

Ugotavljanje okoljskih parametrov, od katerih je odvisen učinek cestnega prometa, je pomemben prispevek k opredeljevanju ukrepov, s katerimi je mogoče zmanjšati oziroma ublažiti onesnaževanje ter vzpostaviti temelje za financiranje zaščitnih ukrepov in okoljskih raziskav, ki naj vodijo k izboljšanju obstoječega stanja, ter novih tehnologij in metod za zmanjšanje negativnih vplivov. Dejavnike sem določil glede na model dinamičnega cestninjenja, z upoštevanjem vidikov trajnostnega razvoja, ki so ga v osnovi izoblikovali Kulauzović in sodelavci (2005), sam pa sem ga nekoliko spremenil in teoretično dopolnil. Ugotovil sem, da so glavni dejavniki (oziroma skupine dejavnikov) vpliva cestnega prometa na okolje, za katere je podatke v veliki meri mogoče zagotoviti z daljinskim zaznavanjem, naslednji:

- ravni zvoka (hrup),

- onesnaževanje zraka s plini in prašnimi delci,
- vpliv na naravo in pokrajino (fizična struktura pokrajine, upravljanje s prometnimi potmi in okoliškimi zemljišči, uporaba prometnega sistema).

Proučil sem tudi smiselna obdobja njihovega posodabljanja. Ugotovitve povzema preglednica 31.

Preglednica 31: Nekatere kategorije dejavnikov vpliva cestnega prometa na okolje in smiselna obdobja posodabljanja.

Table 31: Selected categories of road transport impacts on the environment and acceptable updating intervals.

	enota spremenljivosti	sprejemljiva enota »različnosti«	smiselno obdobje posodabljanja
ravni zvoka (hrup)	ura	dan, večer, noč	petletno
onesnaževanje zraka	ura	dan, večer, noč	petletno
vpliv na naravo in pokrajino	občasno	leto	desetletno

Izziv je metodološki, zato sem nadaljnje proučevanje usmeril na vzorčni primer dejavnika hrup oz. ravni zvoka. Pri ugotavljanju določljivosti ter preverjanju vplivov in posledic sem moral namreč število dejavnikov in spremenljivk zaradi obširnosti teme omejiti. Spremenljivke, ki so potrebne pri ugotavljanju ravni jakosti zvoka, sem izbral, ker so številne, dobro opredeljene in zahtevajo veliko natančnost, uporabne pa so tudi pri študijah drugih dejavnikov. Preučil sem metode računanja širjenja zvoka v okolju in izpostavil dve: Harmonoise, ki se še usklajuje in bo veljala kot referenčna za kartiranje ravni zvoka v EU, ter francosko NMPB, ki je prehodna in se uporablja tudi v Sloveniji. Skladno s potrebami obeh metod sem opredelil zahtevane natančnosti, analiziral različne metode ročnega, polsamodejnega in/ali samodejnega ugotavljanja obodov in višin stavb, reliefne izoblikovanosti, lomnih linij terena, protihrupnih pregrad, pokrovnosti (za ugotavljanje zvočne impedance tal) in podnebnih spremenljivk (temperatura zraka 2 m nad tlemi in stopnja oblačnosti) ter podal smernice za pričakovane natančnosti in smiselnost njihovega določanja in posodabljanja z daljinskim zaznavanjem. Ugotovitve o smiselnih obdobjih njihovega posodabljanja prikazuje preglednica 32.

Za ugotavljanje vplivov cestnega prometa na okolje z vidika priporočljivih senzorjev in platform ni enoznačne rešitve, saj so dejavniki glede potreb modeliranja preveč raznoliki. Pri nekaterih je namreč zahtevano zelo natančno krajevno poznavanje kazalnikov (na primer modeliranje ravni zvoka), drugi pa delujejo bolj na regionalni ravni (na primer



onesnaževanje zraka). Kljub temu je treba izpostaviti zračno lasersko skeniranje (ZLS) in hkraten zajem digitalnih foto posnetkov, saj je tovrsten način zajema zelo primeren za kartiranje koridorjev. Zelo natančne informacije za modeliranje okolja najbolj prizadetega dela prebivalstva, to je tistega, ki živi najbližje cesti, pridobimo že s snemanjem razmeroma ozkega pasu (širine približno 4 km) ob cestninskih cestah.

Preglednica 32: Spremenljivke, pomembne za izračun ravni zvoka, glede na smiselna obdobja posodabljanja.

Table 32: Variables important for environmental noise modelling according to sensible updating intervals.

	enota spremenljivosti	sprejemljiva enota »različnosti«	smiselno obdobje posodabljanja
promet	ura	dan, večer, noč; delavnik, dela prost dan; sezona	letno
reliefna izoblikovanost stavbe	občasno leto	leto	desetletno tri- do petletno
prebivalstvo	leto	leto	tri- do petletno
lomne linije reliefa	občasno	leto	desetletno
protihrupne pregrade	občasno	leto	letno
zvočna impedanca tal	letni čas	polletje	pet- do desetletno
podnebni podatki (temperatura, vlažnost, smer in jakost vetra, oblačnost)	ura; mesec	dan, večer, noč; letni čas	deset- in večletno

Velik del raziskave je bil namenjen obdelavi podatkov ZLS za pridobitev podatkov o višinah in obliki terena ter objektov na njem. Pri obdelavi oblaka točk je smiselna kombinacija metod, saj ne delujejo enako dobro v različnih okoljih. Uporabil sem kombinacijo prilagodljivega goščenja mreže neenakih trikotnikov (angl. adaptive TIN densification, Axelsson 2000) in REIN (angl. REpetitive INterpolation, Kobler et al. 2007) in na ta način združil dobre lastnosti obeh algoritmov, to je dobro delovanje na pozidanih območjih prvega in na strmih gozdnatih pobočjih drugega. Relief, izdelan z večkratno triangulacijo, je v primerjavi z reliefom, pridobljenim z neposrednim rastriranjem, tudi primernejši za nadaljnjo obdelavo. Preostale grobe napake, ki so posledica gostih smrekovih nasadov, ki jih laserski žarek ne predre, sem označil ročno in območja nadomestil z reliefom, ki sem ga izdelal iz oblaka točk, dodatno filtriranega z geomorfološkim filtrom, vgrajenim v REIN, z razmeroma »agresivnimi« nastavitvami, saj sem želel odstraniti prav vse »nepravilne« oblike.

Na širjenje zvoka v prostoru imajo velik vpliv višine stavb. Primerjava nadmorskih višin baze stavb in višin stavb, pridobljenih s prostorskimi analizami lidarskih podatkov, z

vrednostmi iz katastra stavb razkrije, da so si v povprečju zelo podobne (povprečna razlika pri obeh je 0,1 m), vendar je standardni odklon razmeroma velik (pri nadmorskih višinah baze 0,6 m, pri višinah stavb pa 1,1 m). Razlika pomembno vpliva na krajevno spremenljivost ravni zvoka med izračuni, ki uporabljajo uradne evidence, in izračuni, ki vsebujejo natančnejše podatke, zlasti na območjih, kjer so stavbe blizu cestišča.

Pomemben podatek pri računanju ravni zvoka v okolju so tudi prostorske informacije o protihrupnih pregradah. Čeprav so te poleg same umestitve cest v prostor najpomembnejši ukrep zaščite pred povišanimi ravnmi zvoka, v Sloveniji njihove uradne elektronske prostorske evidence ni niti za prostor ob cestah najvišjega ranga. Identifikacija pregrad na odprtem terenu ni problematična, saj jih je lahko prepoznati že iz slike največjih višin odbojev laserskega skeniranja. Težava se pojavi, ko so bodisi pod rastlinjem bodisi morfološko nadaljujejo nasip ali pa se stikajo z drugimi objekti. Samodejna detekcija je otežena še zaradi neuporabnosti intenzitete in filtriranja oblaka točk, saj pregrade običajno ustrezajo tipičnim izločitvenim primerom. Zato sem lege ter nagib in višine protihrupnih pregrad določil ročno; prve na podlagi rastrskih slik ukrivljenosti reliefa, deleža vidnega neba in krajevnega standardnega odklona višin reliefa, druge pa s profiliranjem in trirazsežnim pregledom oblaka laserskih točk.

Zvočna impedanca tal je podatek, ki se zaradi neobstoječih prostorskih informacij v kartiranju ravni zvoka največkrat upošteva le v najosnovnejši obliki (akustično »mehke« in »trde« površine). Zato sem na podlagi študij, ki ugotavljajo povezave med zvočno impedanco tal in tipičnimi kategorijami pokrovnosti oziroma rabe tal, izdelal impedančne karte, primerne za uporabo tako po računski metodi Harmonoise kot francoski NMPB. V literaturi ni zaslediti, da bi bile opravljene raziskave na ta način, tako poglobljeno in s tovrstnimi podatki. Ugotovil sem, da je z vidika varstva pred hrupom kot osnovo za izračun impedančne karte najprimerneje uporabiti Karto dejanske rabe zemljišč MKGP, z vidika čim bolj točnega kartiranja hrupa pa zaradi pomanjkanja meritev v naravi klasifikacijo ortofoto posnetkov oziroma posnetkov visokoločljivih satelitov. Klasifikacija izključno lidarskih podatkov ni dala zelenih rezultatov. Za zelo težavno se je izkazalo določevanje odstavnih pasov, saj imajo bistveno drugačne odbojne lastnosti od vozniških, hkrati pa se ne ločijo dovolj od drugih kategorij. Karta Corine je zaradi prevelike posplošenosti in mešanih razredov pri

ugotavljanju zvočne impedance tal v Sloveniji neuporabna, saj so okrnjene zlasti tiste kategorije, ki so za širjenje zvoka najbolj zanimive.

Tematske točnosti impedančnih kart ni mogoče preveriti, saj terenske meritve upora tal za zvočni tok v Sloveniji še niso bile izvedene. Ker pa ima zvočna impedanca tal pomemben vpliv na širjenje zvoka, je izvedba tovrstnih meritev priporočljiva za umerjanje »standardnih« oziroma najpogosteje uporabljenih kategorij rabe tal oziroma pokrovnosti. Medletna spremenljivost pokrovnosti in lastnosti tal narekuje tudi ugotovitev tipičnih vrednosti oziroma sprememb za značilne sezonske situacije, na primer za zamrznjena tla in neolistan listnati gozd. Ker impedančnih kart za več obdobj v letu ni bilo mogoče izdelati in ker v program za računanje zvoka (SoundPLAN, različica 6.5) ni možno vstaviti podnebnih podatkov, so izračunane ravni zvoka za različna časovna obdobja odvisne le od prometnih podatkov.

Pri izračunanih ravneh zvoka so na študijskem območju največje razlike med dela prostimi dnevi (večinoma torej ob vikendih) januarja in julija ponoči. V januarskih nočeh je zvok v povprečju tišji za 2,0 dB(A), v julijskih pa glasnejši za 2,4 dB(A) od povprečja za noči v dela prostih dneh. Že navidezno majhna razlika v ravni zvoka lahko pomeni veliko spremembo v številu prebivalcev, izpostavljenih prekoračenim mejnim in kritičnim ravnam zvoka na posameznem dolžinskem odseku ceste. Število ljudi, izpostavljenih mejnim ravnam, je glede na celoletno nočno povprečje ob dela prostih dneh januarja v povprečju manjše za 15 % in julija za 10 % večje, pri kitičnih ravneh pa januarja manjše za 50 % in julija večje za 60 %.

Primerjalni izračuni ravni zvoka ob upoštevanju različno pridobljenih prostorskih podatkov izkazujejo pomembnost daljinsko zaznanih podatkov pri ugotavljanju ravni zvoka, saj izračunane vrednosti izražajo razmeroma velika odstopanja tako pri povprečjih kot pri najmanjših in največjih vrednostih. Pomembnejši spremenljivki sta višina stavbe ali dela stavbe in zvočna impedanca tal. Z lidarskimi podatki je mogoče razmeroma preprosto določiti tudi višino kapi strehe, ki je pri računanju ravni zvoka ustrežnejša kot višina slemena stavbe. Na ožjem študijskem območju je v povprečju za 2 m nižja, ravni zvoka pa so zato v povprečju višje za več kot 2 dB(A); kar 20 % sprejemnikov ima ravni zvoka višje od 3 dB(A). Razlika je razumljivo največja za stavbami, kar je hkrati zaskrbljujoče, saj so tam običajno »tiha« območja, namenjena prostočasnim dejavnostim. Na kartah ravni zvoka,

izračunanih na podlagi višin slemen stavb (tudi strateška karta hrupa), so ravni zvoka za stavbami podcenjene.

Pomemben doprinos doktorske naloge znanosti predstavlja metoda preoblikovanja ploskovnih prostorskih podatkov na linijo, ki sem jo zasnoval v zadnjem delu naloge. Metoda omogoča spremljanje števila ljudi (stavb splošnega družbenega pomena, območij za rekreacijo in podobno), izpostavljenih določenemu dejavniku vpliva prometa, na primer prekoračenim mejnim ali kritičnim ravнем zvoka glede na izbrano stopnjo varstva pred hrupom, za vsak dolžinski (na primer kilometrski) odsek določene cestninske ceste. Metoda omogoča tudi razvrščanje dolžinskih odsekov v različne razrede vpliva glede na čas ter s tem prostorsko in časovno spremenljivo cestnino. Meje med razredi lahko določimo na podlagi najvišje ravni varovanja pred škodljivimi učinki ali pa »tolerančni prag« dvignemo. V primeru ravni zvoka lahko na primer upoštevamo mejne in kritične ravni za določeno stopnjo varstva pred hrupom in število prebivalcev, ki so jima izpostavljeni. Z zasnovano metodo lahko upoštevamo tudi druge parametre, na primer vrtce in izobraževalne ustanove, knjižnice, muzeje, stavbe za zdravstveno varstvo (bolnišnice, zdravstvene domove), domove za starejše občane, območja za rekreacijo in območja zavarovane narave. Kolikšen je »tolerančni prag«, katere dejavnike kombinirati in kakšna so razmerja med razredi z vidika cestnine, bo treba določiti v posebni študiji.

## 8 POVZETEK

Namen raziskave je bil preveriti in ovrednotiti smiselnost uporabe daljinskega zaznavanja pri določevanju in spremljanju okoljskih spremenljivk, potrebnih pri modelu prostorsko in časovno spremenljive cestnine. Ugotavljanje okoljskih parametrov, od katerih je odvisen učinek cestnega prometa, ima pomemben prispevek k opredeljevanju ukrepov, s katerimi je mogoče zmanjšati oziroma ublažiti onesnaževanje ter vzpostaviti temelje za financiranje zaščitnih ukrepov in okoljskih raziskav, ki naj vodijo k izboljšanju stanja, ter novih tehnologij in metod za zmanjšanje negativnih vplivov. Vplivi cestnega prometa na okolje so raznoliki in večplastni, zato sem v nalogi opredelil tiste dejavnike in njihove spremenljivke, ki jih je mogoče spremljati z daljinskim zaznavanjem. Dejavnike sem določil glede na model dinamičnega cestninjenja z upoštevanjem vidikov trajnostnega razvoja, ki so ga v osnovi izoblikovali Kulauzović in sodelavci (2005), sam pa sem ga nekoliko spremenil in teoretično dopolnil.

Pri ugotavljanju določljivosti ter preverjanju vplivov in posledic sem moral število dejavnikov in spremenljivk zaradi obširnosti teme omejiti, zato sem izbral le spremenljivke, ki so potrebne pri ugotavljanju ravni jakosti zvoka. So številne, dobro opredeljene in zahtevajo veliko natančnost, uporabne pa so tudi pri študijah drugih dejavnikov. Proučil sem metode računanja širjenja zvoka v okolju in izpostavil dve: Harmonoise, ki se še usklajuje in bo veljala kot referenčna za kartiranje ravni zvoka v EU ter francosko NMPB, ki je prehodna in se uporablja tudi v Sloveniji.

Analiziral sem metode ročnega, polsamodejnega in/ali samodejnega ugotavljanja obodov in višin stavb, reliefne izoblikovanosti, lomnih linij terena, protihrupnih pregrad, pokrovnosti (za ugotavljanje zvočne impedance tal) in podnebnih spremenljivk (temperatura zraka 2 m nad tlemi in stopnja oblačnosti) ter podal smernice za pričakovane natančnosti in smiselnost njihovega določanja in posodabljanja z daljinskim zaznavanjem.

Velik del raziskave je bil namenjen obdelavi podatkov zračnega laserskega skeniranja za pridobitev podatkov o višinah in obliki terena ter objektov na njem. Pri obdelavi oblaka laserskih točk je smiselna kombinacija metod, saj ne delujejo enako dobro v različnih okoljih. Uporabil sem prilagodljivo goščenje mreže neenakih trikotnikov (angl. adaptive TIN densification), ki dobro deluje na pozidanih območjih in REIN (angl. REpetitive INterpolation), ki izdelava natančen relief na strmih gozdnatih pobočjih, ter na ta način združil dobre lastnosti obeh algoritmov. Relief, izdelan z večkratno triangulacijo, je v primerjavi z reliefom, pridobljenim z neposrednim rastriranjem, tudi primernejši za nadaljnjo obdelavo.

Na podlagi študij, ki ugotavljajo povezave med zvočno impedanco tal in tipičnimi kategorijami pokrovnosti oziroma rabe tal, sem izdelal impedančne karte, primerne za uporabo tako po računski metodi Harmonoise kot NMPB. Uporabil sem samodejno klasifikacijo podatkov laserskega skeniranja, pikselsko klasifikacijo posnetkov satelitskega sistema Landsat, objektno klasifikacijo letalskih ortofoto posnetkov in obstoječi bazi Dejanska raba zemljišč in Corine, ki sta bili izdelani z ročno fotointerpretacijo letalskih ortofoto podob oziroma podob sistema Landsat.

V zadnjem delu naloge sem zasnoval metodo preoblikovanja ploskovnih prostorskih podatkov na linijo, ki omogoča spremljanje števila ljudi (stavb splošnega družbenega pomena, območij za rekreacijo in podobno), izpostavljenih določenemu dejavniku vpliva prometa, na primer prekoračenim mejnim ali kritičnim ravnom zvoka glede na izbrano stopnjo varstva pred hrupom, za vsak dolžinski (na primer kilometrski) odsek določene cestninske ceste. Preizkusil sem jo na študijskem območju in s strateško karto hrupa na cestnem odseku Brezovica-Logatec. Metoda omogoča razvrščanje dolžinskih odsekov v različne razrede vpliva glede na čas ter s tem prostorsko in časovno spremenljivo cestnino.

## 9 SUMMARY

The aim of the research was to investigate and evaluate the usefulness of remote sensing for modelling and monitoring environmental variables needed in the spatially and temporally adaptable road toll model. Studies of the parameters that define the impact of road transport on the environment give a significant contribution for identification of measures that can lead to reduction or ease of negative impacts. They can also establish a basis for financing protective measures, environmental research, new technologies and methods for reducing the influences. Road transport impacts are various and multidimensional. In the first part of the thesis I define parameters and their variables which can be monitored with remote sensing. The parameters were selected according to a dynamic road pricing model that includes sustainable development and was described by Kulauzović et al. (2005).

The challenge is methodological; therefore the study is focused on the noise parameter as a sample case. Variables needed in modelling of environmental sound power levels are numerous, well defined, need high accuracy, and are also usable in studies of other parameters. Two methods of computing transport noise are presented: Harmonoise, which will be a reference method for noise mapping in the EU, and the French NMPB, which is transitional and is currently used in Slovenia.

I have analysed methods of manual, semiautomatic and/or automatic determination of:

- relief morphology,
- terrain break lines,
- exterior envelopes and heights of buildings,
- noise barriers,
- land cover (for the determination of the acoustic impedance of ground), and

- climate variables (temperature of air at 2 m above surface and the level of cloudiness).

I have also offered guidelines for expected accuracies of the variables and usefulness of their determination and updating with remote sensing.

A large part of the research was focused on processing airborne laser scanning data for the extraction of information on terrain morphology and heights of objects located on it. I have combined an adaptive TIN densification algorithm filtering with repetitive interpolation (REIN). The first performs well in built up areas and the second creates a very precise raster elevation model on forested slopes. Combining the two methods has merged the best characteristics of both. The elevation model, created with repetitive triangulation is also more suitable for further processing than relief, acquired with direct rasterization.

Based on studies that assess the relationship between the acoustic impedance of ground and typical land use/land cover categories I have created acoustic impedance maps that are suitable for Harmonoise and NMPB calculation methods. The maps were produced with supervised classification of lidar data, object based classification of aerial orthophotos, pixel based classification of Landsat satellite imagery, and existing Actual agricultural land use and Corine land use/land cover databases which were created by manual interpretation of aerial orthophotos and Landsat imagery respectively.

A scheme to transform surface (planar) spatial data to a line is proposed in the last part of the thesis. The method enables evaluating the number of residents (buildings of special social importance, recreational areas and similar) exposed to a certain transport impact (e.g. exceeded limit and critical sound power levels according to the defined noise protection levels) for every road segment (e.g. of a kilometre length) on a toll road. The method has been tested on the study area and with a strategic noise map for the Brezovica-Logatec highway section. The method permits classification of road segments into impact classes according to time, and thus enables spatially and temporally differentiated toll.



## 10 LITERATURA IN VIRI

- Abrams, M., Hook, S. 2002. ASTER user handbook. Pasadena, Jet Propulsion Laboratory: 135 str.
- Ackerman, S.A., Holz, R.E., Frey, R., Eloranta, E.W., Maddux, B.C., McGill, M. 2008. Cloud detection with MODIS. Part II: Validation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 25, 7: 1073-1086.
- Ackerman, S.A., Strabala, K.I., Menzel, Frey, R.A., Moeller, C.C., Gumley, L.E. 1998. Discriminating clear sky from clouds with MODIS. *Journal of Geophysical Research* 103 (D24): 32.141-32.157.
- Ackermann, F. 1999. Airborne laser scanning – present status and future expectations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote sensing* 54, 2-3: 64-67.
- Ahmed, N., Mahtab, A., Agrawal, R., Jayaprasad, P., Pathan, S. K., Ajai, Singh, D. K., Singh, A. K. 2007. Extraction and validation of cartosat-1 DEM. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 35, 2: 121-127.
- Alexandre, A., Barde, J. P., Lamure, C., Langdon F. J. 1975. Road traffic noise. Applied Science Publishers, London: 219 str.
- Ambercore. 2008. Titan survey – divided highway corridor (urban). 1 f.  
[www.ambercore.com/files/TITAN/Highway%20Corridor%20\(Urban\).pdf](http://www.ambercore.com/files/TITAN/Highway%20Corridor%20(Urban).pdf) (4.10.2009).
- Apan, A. A. 1997: Land cover mapping for tropical forest rehabilitation planning using remotely-sensed data. *International journal of remote sensing* 18, 5: 1029-1049.
- Arevalo, V., Gonzalez, J., Ambrosio, J. 2008. Shadow detection in colour high-resolution satellite images. *International Journal of Remote Sensing* 29, 7: 1945-1963.
- Axelsson, P. 2000. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 33, B4-1: 110-117.
- Baatz, M., Hoffmann, C., Willhauck, G. 2008. Progressing from object-based to object-oriented image analysis. V: Blaschke, T., Lang, S., Hay, G. J. (ur.). *Object-based image analysis. Spatial concepts for knowledge-driven remote sensing applications*. Berlin, Springer-Verlag: 29-42.
- Baltsavias, E. P. 1999. A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing* 54: 83-94.
- Baltsavias, E. P. 2004. Object extraction and revision by image analysis using existing geodata and knowledge: Current status and steps towards operational systems. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing* 58, 3-4: 129-151.
- Baum, B.A., Platnick, S. 2006. Introduction to MODIS Cloud Products. V: Qu, J.J., Gao, W., Kafatos, M., Murphy, E.E., Salomonson, V.V. (ur.). *Earth Science Satellite Remote Sensing. Science and Instruments*. Peking, Tsinghua University Press, Berlin, Springer-Verlag: 74-91.

- Berglund, B., Lindvall, T. (ur). 1995. Community noise. *Archives of the Center for Sensory Research* 2, 1: 1-195.
- Beuving, M., Hemsworth, B. 2006. Improved methods for the assessment of the generic impact of noise in the environment. *Imagine – Final synthesis report*. 71 f.  
[www.imagine-project.org/bestanden/IMA10TR-061116-AEATNL10\\_D15.pdf](http://www.imagine-project.org/bestanden/IMA10TR-061116-AEATNL10_D15.pdf)
- Bishop, T. F. A., McBratney, A. B., Whelan, B. M. 2001. Measuring the quality of digital soil maps using information criteria. *Geoderma* 103, 1: 95-111.
- Bloch, M., Harrower, M. 2006. MapShaper.org: A Map Generalization Web Service. *Proceedings of Autocarto 2006*, Vancouver, WA, ZDA: 11 str.  
[www.cartogis.org/publications/autocarto-2006/blochharrower.pdf](http://www.cartogis.org/publications/autocarto-2006/blochharrower.pdf) (27.1.2009).
- Boor, C. de. 2001. *A Practical Guide to Splines*. Berlin, Springer-Verlag: 372 str.
- Burrough, P. A., Wilson, J. P., Van Gaans, P. F. M., Hansen, A. J. 2001. Fuzzy k-means classification of topoclimatic data as an aid to forest mapping in the Greater Yellowstone Area, USA. *Landscape ecology* 16, 6: 523-546.
- Boštjančič Čuš, B. 2006. Interpretacijski ključ: Podroben opis metodologije zajema dejanske rabe kmetijskih in gozdnih zemljišč. Ljubljana, Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano: 85 f.
- Boyd, D., in Hill, R. 2007. Validation of airborne lidar intensity values from a forested landscape using hymap data: preliminary analyses. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 36, 3/W52: 71-76.  
[www.commission3.isprs.org/laser07/final\\_papers/Boyd\\_2007.pdf](http://www.commission3.isprs.org/laser07/final_papers/Boyd_2007.pdf) (01.10.2007).
- Braunstein in Berndt. 2008. *SoundPLAN. User's manual*. Braunstein + Berndt GmbH, SoundPLAN LLC: 474 str.
- Brenner, C. 2001. City models – automation and research in practice. *Photogrammetric Week'01*. Heidelberg, Nemčija: 149-158.
- Brenner, C. 2005. Building reconstruction from images and laser scanning. *International journal of applied Earth observation and geoinformation* 6: 186-198.
- Bretar, F. 2008. Feature extraction from lidar data in urban areas. V: Shan, J., Toth, C. K. (ur.). *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. New York, Taylor and Francis: 403-420.
- Briese, C. 2004. Three-dimensional modelling of breaklines from airborne laser scanner data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 35, 3: 1097-1102.  
[www.isprs.org/congresses/istanbul2004/comm3/papers/430.pdf](http://www.isprs.org/congresses/istanbul2004/comm3/papers/430.pdf) (15.9.2008).
- Briese, C., Pfeifer, N. 2008a. Towards automatic feature line modelling from terrestrial laser scanner data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 37, 5: 463-468.
- Briese, C., Pfeifer, N. 2008b. Line based reconstruction from terrestrial laser scanning data. *Journal of Applied Geodesy* 2, 2: 85-95.
- Bruel in Kjaer. 2001. *Environmental noise*. Naerum, Danska: 67 str.
- Brügelmann, R. 2000. Automatic breakline detection from airborne laser range data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 33, 3: 109-115.

- Brzank, A., Heipke, C. 2006. Classification of lidar data into water and land points in coastal areas. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 36, 3: 197-202.
- Budin, J. 1975. Razširjanje radijskih valov. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko: 226 str.
- Burnik, U. 2009. Ali kdo v Sloveniji izvaja meritve akustične impedance tal na prostem? Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Laboratorij za digitalno obdelavo signalov, slik in videa. 12. maj 2009. Osebna komunikacija.
- Buyuksalih, G., Jacobsen, K., Baz, I. 2008. DEM generation based on optical space images. EARSel Workshop 'Remote Sensing for Developing Countries in Conjunction with GISDECO 08'. Istanbul, Turčija: 10 str.  
[www.ipi.uni-hannover.de/uploads/tx\\_tkpublikationen/Buyuksalih\\_istanbul.pdf](http://www.ipi.uni-hannover.de/uploads/tx_tkpublikationen/Buyuksalih_istanbul.pdf) (26.8.2009).
- Buyuksalih, G., Oruc, M., Topan, H., Jacobsen, K. 2004. Geometric accuracy evaluation, DEM generation and validation for SPOT-5 Level 1B stereo scene. EARSel Workshop Remote Sensing for Developing Countries. Kairo, Egipt: 6 str.
- Čampa, J., Černe, S., Rovšek, J., Zlobec, M. 2009. Transport, Slovenija, 2007. Statistične informacije 22: 26 str.  
[www.stat.si/doc/statinf/22-si-084-0901.pdf](http://www.stat.si/doc/statinf/22-si-084-0901.pdf) (4.8.2009).
- Campbell, J.B., 1996. Introduction to remote sensing. New York, Taylor and Francis: 622 str.
- Castilla, G., Hay, G. J. 2008. Image objects and geographic objects. V: Blaschke, T., Lang, S., Hay, G. J. (ur.). Object-based image analysis. Spatial concepts for knowledge-driven remote sensing applications. Berlin, Springer-Verlag: 91-110.
- Chiari, C., Iacoponi, A., Van Maercke, D. 2007. Guidelines and good practice on strategic noise mapping. Imagine – WP1 Final report. 135 f.  
[www.imagine-project.org/bestanden/IMA01-TR22112006-ARPAT12\\_D8.zip](http://www.imagine-project.org/bestanden/IMA01-TR22112006-ARPAT12_D8.zip) (13.4.2008).
- Chien, C. F., Soroka, W. W. 1975. Sound propagation along an impedance plane. *Journal of Sound and Vibration* 43, 1: 9-20.
- Cigale, D. 2002. Geografsko okolje in promet. V: Lah, A. (ur.). Promet in okolje. Ljubljana, Svet za varstvo okolja Republike Slovenije: 32-35.
- Clode, S., Rottensteiner, F., Kootsookos, P., Zelniker E. E. 2007. Detection and vectorization of roads from lidar data. *Photogrammetric engineering and remote sensing* 73, 5: 517-535.
- Commission for Integrated Transport. 2006a. World Review of Road Pricing Phase 1: Lessons for the UK. 16 str.  
[www.cfit.gov.uk/docs/2006/wrrp/wrrp1/pdf/wrrp1.pdf](http://www.cfit.gov.uk/docs/2006/wrrp/wrrp1/pdf/wrrp1.pdf) (11.1.2007).
- Commission for Integrated Transport. 2006b. World review of road pricing. Phase 2. Final report.  
[www.cfit.gov.uk/docs/2006/wrrp/wrrp2/pdf/wrrp2-finalreport.pdf](http://www.cfit.gov.uk/docs/2006/wrrp/wrrp2/pdf/wrrp2-finalreport.pdf) (11.1.2007).
- Commission for Integrated Transport. 2006c. World review of road pricing. Phase 2. Case studies.  
[www.cfit.gov.uk/docs/2006/wrrp/wrrp2/case/pdf/wrrp2-casestudies.pdf](http://www.cfit.gov.uk/docs/2006/wrrp/wrrp2/case/pdf/wrrp2-casestudies.pdf) (11.1.2007).

- Čudina, M. 2009. Ali kdo v Sloveniji izvaja meritve akustične impedance tal na prostem? Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za energetske delovne stroje in tehnično akustiko. 12. maj 2009. Osebna komunikacija.
- Defrance, J., Salomons, E., Noordhoek, I., Heimann, D., Plovsing, B., Watts, G., Jonasson, H., Zhang, X., Premat, E., Schmich, I., Aballea, F., Baulac, M., Roo, F. 2007. Outdoor sound propagation reference model developed in the European Harmonoise project. *Acta Acustica united with Acustica*, 93, 2: 213-227.
- Delany, M. E., Bazley, E. N. 1970. Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied Acoustics* 3: 105-116.
- Derrien, M., LeGléau, H., Daloze, J.-F., Haeffelin, M. 2005. Validation of SAFNWC/MSG cloud products with one year of SEVIRI data. EUMETSAT Meteorological Satellite Data Users' conference. Dubrovnik: 8 str.  
[www.meteorologie.eu.org/safnwc/publis/conf\\_dubrovnik.pdf](http://www.meteorologie.eu.org/safnwc/publis/conf_dubrovnik.pdf) (12.10.2009).
- Devereux, R., Dawson, J., Dix, M. et al. 2004. Feasibility study of road pricing in the UK – Full report. Department for transport.  
[www.dft.gov.uk/pgr/roads/introtoroads/roadcongestion/feasibilitystudy/studyreport/feasibilityfullreport](http://www.dft.gov.uk/pgr/roads/introtoroads/roadcongestion/feasibilitystudy/studyreport/feasibilityfullreport) (10.8.2009).
- Di, K., Ma, R. in Li, R. 2003. Geometric processing of Ikonos Geo stereo imagery for coastal mapping applications. *Photogrammetric engineering and remote sensing* 69, 8: 873-879.
- Dietrich, H. 2003. Numerical Simulations of Wind and Sound Propagation Through an Idealised Stand of Trees. *Acta Acustica united with Acustica* 89, 5: 779-788.
- Dolar, M. 2004. GIS kot orodje pri izdelavi klimatskih kart. V: Podobnikar, T., Perko, D., Hladnik, D. Krevs, M., Čeh, M., Stančič, Z. (ur.). *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2003–2004*. Ljubljana, Založba ZRC: 195-202.
- Douglas, D.H., Peucker, T.K. 1973. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitised line or its caricature. *The Canadian Cartographer* 10, 2: 112-122.
- DRSC. 2008. Podatki o štetju prometa na državnih cestah v Republiki Sloveniji. Zgoščenka. Ljubljana, Direkcija Republike Slovenije za ceste.
- Dubayah, R. O., Blair, B. J., Bufton, J., Clarke, J., JaJa, D., Knox, J., Luthcke, R., Prince, S. S., Weishample, J. 1997. The vegetation canopy lidar mission. *Proceedings of Land Satellite Information in the Next Decade, II: Sources and Applications*. Bethesda (MD). American Society of Photogrammetry and Remote Sensing: 100-112.
- Duro, Nicholas D. C., Coops, N. C., Wulder, M. A., Han, T. 2007. Development of a large area biodiversity monitoring system driven by remote sensing. *Progress in Physical Geography* 31, 3: 235-260.
- Elvik, R. 1994. The external costs of traffic injury: definition, estimation, and possibilities for internalization. *Accident Analysis and Prevention*, 26, 6: 719-732.
- ESRI Help 1. 2008. How Simplify Line (Data Management) works.
- ESRI Help 2. 2008. Using the Spatial Analyst toolbar to convert between raster and features.

- Evropska komisija. 1994. CORINE Land Cover. Luksemburg, Urad za uradne publikacije Evropskih skupnosti: 163 str.
- Evropska komisija. 1995. Green paper – Towards fair and efficient pricing in transport. Policy options for internalising the external costs of transport in the European Union. COM 1995 691 z dne 20 decembra 1995. Luksemburg, Urad za uradne publikacije Evropskih skupnosti: 52 str.
- Evropska komisija. 2001. Bela knjiga – Evropska prometna politika za 2010: čas za odločitev. COM 2001 370 z dne 12. septembra 2001. Luksemburg, Urad za uradne publikacije Evropskih skupnosti: 119 str.
- Evropska komisija. 2004. Transport-related impacts and instruments for sensitive areas. Final report – part 1. 95 str.  
[europa.eu.int/comm/environment/air/sat.htm](http://europa.eu.int/comm/environment/air/sat.htm) (7.7.2008).
- Evropska komisija. 2005. Amending Directive 1999/62/EC on the charging of heavy goods vehicles for the use of certain infrastructures. Recommendations for European Parliament Second Reading. 11 str.
- Evropska komisija. 2006. Naj Evropa ostane v gibanju. Trajnostna mobilnost za našo celino. Vmesni pregled Bele knjige Evropske komisije o prometu iz leta 2001. Luksemburg, Urad za uradne publikacije Evropskih skupnosti: 39 str.  
[www.ec.europa.eu/transport/transport\\_policy\\_review/doc/2006\\_3167\\_brochure\\_sl.pdf](http://www.ec.europa.eu/transport/transport_policy_review/doc/2006_3167_brochure_sl.pdf) (8.7.2008).
- Evropska okoljska agencija. 2003. Indicator fact sheet. TERM 2002 25 EU – External costs of transport. København, Danska, European Environment Agency: 9 f.
- Evropska okoljska agencija. 2007. CLC2006 technical guidelines. København, Danska: 66 str.  
[www.eea.europa.eu/publications/technical\\_report\\_2007\\_17/at\\_download/file](http://www.eea.europa.eu/publications/technical_report_2007_17/at_download/file) (8.6.2009).
- Ferraiuolo, G., Meglio, F., Pascasio, V., Schirinzi, G. 2009. DEM reconstruction accuracy in multichannel SAR interferometry. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing 47, 1: 191-201.
- Finegold, L. S., Harris, C. S., von Gierke, H. E. 1994. Community annoyance and sleep disturbance: updated criteria for assessment of the general transportation noise on people. Noise Control Engineering Journal 42: 25-30.
- Foody, G. M. 2002: Status of land cover classification accuracy assessment. Remote Sensing of Environment 80, 1: 185-201.
- Gams, I. 1960. O višinski meji naseljenosti, ozimine, gozda in snega v slovenskih gorah. Geografski vestnik 32: 59-69.
- Geografski terminološki slovar. 2005. Ljubljana, Založba ZRC: 451 str.
- Glennie, C. 2009. Kinematic terrestrial light-detection and ranging system for scanning. Transportation research record 2105: 135-141.
- Globevnik, A., Štimac, A. 2008. Strateška karta hrupa za Mestno občino Ljubljana; za cestni in železniški promet na območju MOL – za leto 2006. Maribor, A-Projekt: 223 f.
- Gorevski, P. V., Gessler, P. E., Jankowski, P. 2003. Integrating a fuzzy k-means classification and a Bayesian approach for spatial prediction of landslide hazard. Journal of Geographical Systems 5, 3: 223-251.
- Great Britain Department of Transport and the Welsh Office. Calculation of Road Traffic Noise (CRTN). 1988. London, Stationery Office Books: 95 str.

- Guide du bruit des transports terrestres – Prévission des niveaux sonores. 1980. Centre d'etudes des transports urbains, Bagneux, Francija, 317 str.
- Gülch, E., Kaartinen, H., Hyyppä, J. 2008. Quality of buildings extracted from airborne laser scanning data: Results of an empirical investigation on 3D building reconstruction. V: Shan, J., Toth, C. K. (ur.). Topographic laser ranging and scanning: principles and processing. New York, Taylor and Francis: 535-574.
- Haala, N., Petera, M., Kremerb, J., Hunter, G. 2008. Mobile lidar mapping for 3D point cloud collection in urban areas – a performance test. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 37, B5: 1119-1124.
- Harrower, M., Bloch, M. 2006. MapShaper.org: A map generalization web service. Exploring Geovisualization 26, 4: 22-27.
- Hassall, J. R., Zaveri, K. 1979. Acoustic noise measurements. Bruel & Kjaer Publication, Naerum, Danska, 280 str.
- Heimann, D., de Franceschi, M., Emeis, S., Lercher, P., Seibert, P. (ur.). 2007. Air pollution, traffic noise and related health effects in the alpine space – A guide for authorities and consultants. ALPNAP comprehensive report. Trento, Italija, Università degli Studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale: 335 str.
- Heimann, D., Salomons, E.M. 2004. Testing meteorological classifications for the prediction of long-term average sound levels. Applied Acoustics 65: 925-950.
- Hemsworth, B. 2007. Determination of  $L_{den}$  by calculation – definition of meteorological classes. 6 f. [www.imagine-project.org/bestanden/IMA10TR-070222-AEATNL01\\_calculation%20of%20Lden.pdf](http://www.imagine-project.org/bestanden/IMA10TR-070222-AEATNL01_calculation%20of%20Lden.pdf) (16.10.2008).
- Hengl, T. 2006. Finding the right pixel size. Computers & Geosciences 32: 1283–1298.
- Hočevár, M., Kobler, A. 2001. Uporaba podatkov CORINE Land Cover za izgradnjo informacijskega sistema o gozdovih na državni ravni. Geodetski vestnik 46, 3: 353-369.
- Hrvatín, M., Perko, D. 2002. Ugotavljanje ukrivljenosti površja z digitalnim modelom višin in njena uporabnost v geomorfologiji. V: Podobnikar, T., Perko, D., Krevs, M., Stančič, Z., Hladnik, D. (ur.). Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2001-2002. Ljubljana, Založba ZRC: 65-72.
- Hyyppä, J., Hyyppä, H., Litkey, P., Yu, X., Haggrén, H., Rönnholm, P., Pyysalo, U., Juho Pitkänen, J., Maltamo, M. 2004. Algorithms and methods of airborne laser-scanning for forest measurements. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 36, 3/W2: 82-89. [www.isprs.org/commission8/workshop\\_laser\\_forest/hyyppae.pdf](http://www.isprs.org/commission8/workshop_laser_forest/hyyppae.pdf) (20.4.2009)
- Hyyppä, J., Hyyppä, H., Yu, X., Kaartinen, H., Kukko, A., Holopainen, M. 2009. Forest inventory using small-footprint airborne lidar. V: Shan, J., Toth, C. K. (ur.). Topographic laser ranging and scanning: principles and processing. New York, Taylor and Francis: 335-370.
- Hyyppä, J., Schardt, M., Haggren, H., et al. 2001. HIGH-SCAN: The first European-wide attempt to derive single tree information from laser scanner data. Photogrammetric journal of Finland 17, 2: 58-68.
- Jaafar, J., Priestnall, G., Mather, P.M. 1999. The effects of lidar DSM grid resolution on categorising residential and industrial buildings. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing

- 32, 3/W14.  
[www.isprs.org/commission3/lajolla/pdf/p151.pdf](http://www.isprs.org/commission3/lajolla/pdf/p151.pdf) (4.3.2009)
- Jacobsen, K. 2004. DEM generation from satellite data. V: Goossens, R. (ur.): Remote Sensing in Transition. Ghent, Belgija: 513-525.
- Jacobsen, K., Crespi, M., Fratarcangeli, F., Giannone, F. 2005. DEM generation with Cartosat-1 stereo imagery.
- Jacobsen, K., Lohmann P. 2003. Segmented filtering of laser scanner DSMs. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 34, 3/W13.  
[www.isprs.org/commission3/wg3/workshop\\_laserscanning/papers/jacobsen\\_alsdd2003.pdf](http://www.isprs.org/commission3/wg3/workshop_laserscanning/papers/jacobsen_alsdd2003.pdf) (25.4.2009)
- Johnston, S., Karlsson, K.-G. 2007. Meteosat 8 SEVIRI and NOAA AVHRR cloud products. Meteorologi 127: 42 str.
- Karta Dejanske rabe zemljišč. 2008. Ljubljana, Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano.  
[rkg.gov.si/gerk/documents/raba\\_2008\\_10\\_21.zip](http://rkg.gov.si/gerk/documents/raba_2008_10_21.zip) (11.12.2008).
- Kastelic, T., Maher, T., Žura, M., et al. 2001. Novelacija študije cestninskega sistema na AC in HC v RS. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Prometnotehniški inštitut: 108 f.
- Kataster stavb – opis kakovosti izdelka. 2004. 4 f. [prostor.gov.si/vstop/fileadmin/struktura/Kakovos31.doc](http://prostor.gov.si/vstop/fileadmin/struktura/Kakovos31.doc) (23.4.2004).
- Kilian, J., Haala, N., English, M. 1996. Capture and evaluation of airborne laser scanner data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 31, B3: 383-388.
- Kladnik, D. 1999. Leksikon geografije podeželja. Ljubljana, Inštitut za geografijo: 318 str.
- Klæboe, R., Engelen, E., Steinnes, M. 2006. Context sensitive noise impact mapping. Applied Acoustics 67, 7: 620-642.
- Klæboe, R. 2007. Are adverse impacts of neighbourhood noisy areas the flip side of quiet area benefits? Applied Acoustics 68, 5: 557-575.
- Kluijver, H. de, Stoter, J. 2003. Noise mapping and GIS: optimising quality and efficiency of noise effect studies. Computers, environment and urban systems 27: 85-102.
- Kobler, A., Pfeifer, N., Ogrinc, P., Todorovski, L., Oštir, K., Džeroski, S. 2007. Repetitive interpolation – a robust algorithm for DTM generation from Aerial Laser Scanner Data in forested terrain. Remote sensing of environment 108, 1: 9-23.
- Kokalj, Ž. 2004. Vrednotenje pokrajinskoekoloških tipov Slovenije v luči pokrovnosti, pridobljene s klasifikacijo satelitskih posnetkov Landsat. Diplomsko naloga. Ljubljana, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo: 102 str.
- Kokalj, Ž., Oštir, K. 2006. Ugotavljanje pokrovnosti Slovenije iz satelitskih posnetkov Landsat. Geografski vestnik 78, 2: 85-95.
- Kokalj, Ž., Oštir, K. 2007. Land cover mapping using Landsat satellite image classification in the Classical Karst - Kras region. Acta Carsologica 36, 3: 433-440.

- Kokalj, Ž., Zakšek, K., Oštir, K. 2008. Uporaba laserskega skeniranja za opazovanje preteklih pokrajin - primer okolice Kobarida. V: Perko, D., Zorn, M., Razpotnik, N., Čeh, M., Hladnik, D., Krevs, M., Podobnikar, T., Repe, B., Šumrada, R. (ur.). Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2007-2008, (GIS v Sloveniji, 9). Ljubljana, Založba ZRC: 321-329.
- Kokot, D., Kokalj, Ž., Kolšek, V., Brozovič, R. 2008 Dynamic toll collection system. V: Žnidarič, A. (ur.). TRA, Transport Research Arena Europe 2008. Greener, safer and smarter road transport for Europe, Proceedings. Ljubljana, DDC, ZAG, DRC: 7 str.
- Komac, M. 203. Napoved tveganja pred plazovi z analizo satelitskih in drugih prostorskih podatkov. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo: 235 str.
- Kosmatin Fras, M., Attwenger, M., Bitenc, M. 2007. Land use classification based on the intensity value of the reflected laser beam. *Geodetski vestnik* 51, 3: 501-518.
- Košmelj, B., Arh, F., Doberšek Urbanc, A., Ferligoj, A., Omladič, M. 2001. Statistični terminološki slovar. Ljubljana, Statistično društvo Slovenije, Statistični urad Republike Slovenije: 403 str.
- Kotarba, A.Z. 2009. A comparison of MODIS-derived cloud amount with visual surface observations. *Atmospheric Research* 92: 522-530.
- Kragh, J., Jonnason, H., Plovsing, P. 2006. User's Guide Nord2000 Road. 51 f. [www.mst.dk/nr/rdonlyres/9dd1a49c-be51-49f3-8f25-129ec57fe426/0/usersguidenord2000road.pdf](http://www.mst.dk/nr/rdonlyres/9dd1a49c-be51-49f3-8f25-129ec57fe426/0/usersguidenord2000road.pdf) (21. 5. 2008).
- Krajnc, J. 2005. Dinamični model izračunavanja cestnine. Magistrska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Ekonomska fakulteta: 63 str.
- Kramer, H. J. 2002. Observation of the earth and its environment. Survey of missions and sensors. Berlin, Springer: 1510 str.
- Kraus, K., Pfeifer, N. 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 53: 193-203.
- Kremer, J., Hunter, G. 2007. Performance of the StreetMapper Mobile LIDAR Mapping System in "Real World" Projects. V: Fritsch, D. (ur.). Photogrammetric Week 2007. Stuttgart, Nemčija, Wichmann: 215-225.
- Krupnik, A. 2000. Accuracy assessment of automatically derived digital elevation models from SPOT images. *Photogrammetric engineering and remote sensing* 66, 8: 1017-1023.
- Kulauzović, B., Brozovič, R., Štrukelj, D., Kolšek, V., Žnidarič, A., Leban, B., Kokot, K., Lavrič, I., Ramšak, M., Oštir, K., Podobnikar, T., Kokalj, Ž. 2005. Priprava izhodišč za izdelavo metodologije dinamičnega cestninjenja z upoštevanjem vidikov trajnostnega razvoja. Ljubljana, Ministrstvo za promet: 117 f.
- Kurakula, V. 2007. A GIS-Based approach for 3D noise modelling using 3D city models. Magistrsko delo. Enschede, Nizozemska, International institute for geo-information science and Earth observation. 113 str.
- Lah, A. (ur.). 2002a. Promet in okolje. Ljubljana, Svet za varstvo okolja Republike Slovenije: 96 str.
- Lah, A. (ur.). 2002b. okoljski pojavi in pojmi. Ljubljana, Svet za varstvo okolja Republike Slovenije: 208 str.



- Lang, S. 2008. Object-based image analysis for remote sensing applications: modelling reality – dealing with complexity. V: Blaschke, T., Lang, S., Hay, G. J. (ur.). Object-based image analysis. Spatial concepts for knowledge-driven remote sensing applications. Berlin, Springer-Verlag: 3-27.
- Lee, D., Hardy, P. 2005. Automating generalization – tools and models. XXII International Cartographic Conference. Španija, A Coruña: 10 str.  
[www.pghardy.net/paul/papers/2005\\_icc\\_coruna\\_lee\\_hardy.pdf](http://www.pghardy.net/paul/papers/2005_icc_coruna_lee_hardy.pdf) (15.5.2009).
- Leica Geosystems. 2005. Edras Field Guide. 744 str.
- Liang, X, Hyypä, J., Matikainen, L. 2007. Deciduous-coniferous tree classification using difference between first and last pulse laser signatures. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 36, 3/W52: 253-257.  
[www.commission3.isprs.org/laser07/final\\_papers/Liang\\_2007.pdf](http://www.commission3.isprs.org/laser07/final_papers/Liang_2007.pdf) (22.9.2009).
- Lillesand, T. M., in Kieffer, R. W. 1994. Remote sensing and image interpretation. New York, John Wiley and Sons: 750 str.
- Lindsey R., Herring, D. 2002. MODIS - Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer. NASA's Earth observing system. Maryland, Goddard Space Flight Center: 25 f.
- Lohmann, P., Koch, A. Schaeffer, M. 2000. Approaches to the filtering of laser scanner data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 33, B3-1: 534-541.  
[www.ipi.uni-hannover.de/uploads/tx\\_tkpublikationen/paper\\_470.pdf](http://www.ipi.uni-hannover.de/uploads/tx_tkpublikationen/paper_470.pdf) (15.7.2009).
- Loucks, C. Leimgruber, P. 2007. Trends in species populations. V: Strand, H., Höft, R., Strittholt, J., Horning, N., Miles, L., Fosnight, E., Turner, W. (ur.). Sourcebook on remote sensing and biodiversity indicators. Montreal, Kanada, Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Technical Series 32: 121-130.
- Lovrenčak, F., Orožen Adamič, M. 1999. Ljubljansko barje. V: Perko, D., Orožen Adamič, M. (ur.). Slovenija – pokrajine in ljudje. Ljubljana, Mladinska knjiga: 380-391.
- Maibach, M., Schreyer, C., Sutter, D., Van Essen, H.P., Boon, B.H., Smokers, R., Schroten, A., Doll, C., Pawlowska, B., Bak, M. 2007. Handbook on estimation of external costs in the transport sector. Delft, Nizozemska, CE Delft: 332 str.
- Marcola, T. 2009. Metoda za izračun hrupne obremenitve NMPB in verifikacija na konkretnem primeru. Diplomaska naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 86 str.
- Mesarec, B., Lep, M. (ur.). 2004. Analiza eksternih stroškov prometa. Končno poročilo. Ljubljana: 177 f.
- Miki, Y. 1990. Acoustical properties of porous materials - Modifications of Delany-Bazley models. Journal of the Acoustical Society of Japan (E) 11, 1: 19-24.
- Ming-Jer, H., Shiahn-Wern, S., Liang-Hwei, L., Chin-Chung, K. 2008. Knowledge-based approach to urban feature classification using aerial imagery with lidar data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 74, 12: 1473-1485.
- Mordant, C., Saligny, L., Poulet-Crovisier, N. 2006. La circulation des objets métalliques à l'âge du Bronze entre Rhône et Saône: utilisation d'une transformation cartographique linéaire. V: Mappemonde, 83, 3. Montpellier: Maison de la Géographie.  
[mappemonde.mgm.fr/num11/articles/art06304.html](http://mappemonde.mgm.fr/num11/articles/art06304.html) (15.1.2007).

- Mumby, P.J., Green, E. P., Edwards, A. J., Clark, C. D. 1999. The cost-effectiveness of remote sensing for tropical coastal resources assessment and management. *Journal of Environmental Management* 55: 157-166.
- Nardinocchi, C., Forlani, G., Zingaretti, P. 2003. Classification and filtering of laser data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 34, 3/W13.  
[www.isprs.org/commission3/wg3/workshop\\_laserscanning/papers/nardinocchi\\_alsdd2003.pdf](http://www.isprs.org/commission3/wg3/workshop_laserscanning/papers/nardinocchi_alsdd2003.pdf) (22.7.2009).
- Nelson, P. M. (ur.) 1987. *Transportation noise reference book*. Butterworth, London, 520 str.
- Neubert, M., Herold, H., Meinel, G. 2008. *Assessing image segmentation quality – concepts, methods and application. Spatial concepts for knowledge-driven remote sensing applications*. Berlin, Springer-Verlag: 769-784.
- Nota, R., Barelds, R., Maercke, D. V. 2005. *Harmonoise WP3 engineering method for road traffic and railway noise after validation and fine tuning. Technical report – deliverable 18: 53 f.*
- NPL. 2007. *Guide to predictive modelling for environmental noise assessment. Appendix A: Sound propagation theory and methodologies*. Teddington, Velika Britanija, National Physical Laboratory: 30 str.  
[resource.npl.co.uk/acoustics/techguides/envnoiseassessment/appendix\\_a.pdf](http://resource.npl.co.uk/acoustics/techguides/envnoiseassessment/appendix_a.pdf)
- NT ACOU 104. 1999. *Nordtest method – ground surfaces: Determination of the acoustic impedance*. Espoo, Finska, Nordtest: 14 f.
- Öhrström, E. 1995. Effects of low levels of road traffic noise during the night: a laboratory study on number of events, maximum noise levels and noise sensitivity. *Journal of Sound and Vibration* 179: 603-615.
- Orožen Adamič, M. (ur.), Perko, D. (ur.), Kladnik, D. (ur.). 1995. *Krajevni leksikon Slovenije*. Ljubljana, DZS: 638 str.
- Oštir, K. 2006. *Daljinsko zaznavanje*. Ljubljana, Založba ZRC: 250 str.
- Ouis, D. 2001. Annoyance from road traffic noise: a review. *Journal of Environment Psychology* 21: 101-120.
- Pavlin, B. 1998. *Uporaba podatkov zemeljskoopazovalnih satelitov za izdelavo tematskih kart: primer stare občine Nova Gorica*. Doktorska disertacija. Ljubljana, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo: 157 str.
- Perko, D. 1998. *Nadmorske višine površja*. Geografski atlas Slovenije. Ljubljana, DZS: 84-85.
- Petek, F., Gabrovec, M. 2004. V Sloveniji vedno manj gozda? (Ne)uporabnost metodologije CORINE Land Cover. *Delo, priloga znanost*, 30.12.2004: 17.
- Pfeifer, N., Gorte, B., Oude Elberink, S. 2004. Influences of vegetation on laser altimetry – analysis and correction approaches. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 36, 8/W2: 283-287.
- Pfeifer, N., Mandlbürger, G. 2008. Lidar data filtering and DTM generation. V: Shan, J., Toth, C. K. (ur.). *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. New York, Taylor and Francis: 307-333.
- Plut, D. 2004. *Zeleni planet? Prebivalstvo, energija in okolje v 21. stoletju*. Radovljica, Didakta: 239 str.

- Podobnikar, T. 2001. Digitalni model reliefa iz geodetskih podatkov različne kakovosti. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo: 343 str.
- Podobnikar, T., Zakšek, K., Šorli, U., Švab, A., Oštir, K., Kokalj, Ž., Robič, M., Veljanovski, T. 2004. Izdelava modela reliefa Slovenije. Ljubljana, Inštitut za antropološke in prostorske študije: 160 f.
- Polič, M. 1995. Ekopsihološki vidiki cestnega prometa. V: Mejač, Ž. (ur.). Načrtovanje in izbor variant daljinskih cest s poudarkom na presojah vplivov na okolje. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor, Urad RS za prostorsko planiranje: 115-119.
- Press, H. W., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., Flannery, B. P. 2007. Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing. Cambridge, Cambridge University Press: 1256 str.
- Rainer, F., Bickel, P. (ur.). 2001. Environmental external costs of transport. Berlin, Springer-Verlag: 326 str.
- Rakovec, J., Žagar, M., Bertalanič, R., Cedilnik, J., Gregoric, G., Skok, G., Žagar, N. 2009. Vetrovnost v Sloveniji. Ljubljana, Založba ZRC: 177 str.
- Ramšak, M. 2009. Ali kdo v Sloveniji izvaja meritve akustične impedance tal na prostem? Ljubljana, Zavod za gradbeništvo, Akustični laboratorij. 8. maj 2009. Osebna komunikacija.
- Raw, G. J., Griffiths, I. D. 1988. Individual differences to road traffic noise. *Journal of Sound and Vibration* 121: 463-471.
- Rebolj, I. 2006. Analiziranje in oblikovanje upravljanja obstoječih cestninskih sistemov. *Organizacija* 39, 9: 575-584.
- Rejec Brancelj, I., Lampek Pavčnik, I. 2003. Pokrovnost tal I&CLC 2000. Agencija RS za okolje in Gisdata, Ljubljana. 6 f.
- Relster, E. 1975. Traffic noise annoyance. Polyteknisk Forlag, Lyngby, Danska, 137 str.
- Renterghem, T. Van, Botteldooren, D. 2007. Influence of temporal resolution of meteorological and traffic data on long-term average sound levels. *Acta Acustica united with Acustica* 93, 6: 976-990.
- Ricci, A., Rainer, F. 1999. Calculating transport environmental costs. Final report of the expert advisors to the High level group on infrastructure charging (Working group 2). 29 f.
- Richter, R., Müller, A. 2005. De-shadowing of satellite/airborne imagery. *International Journal of Remote Sensing* 26, 15: 3137-3148.
- Riegl, 2009. LMS-Q560 – datasheet. Airborne laser scanner for full waveform analysis. 6 f. [www.riegl.com/uploads/tx\\_pxpriegl/downloads/10\\_Datasheet\\_LMS-Q560\\_05-03-2009.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegl/downloads/10_Datasheet_LMS-Q560_05-03-2009.pdf) (2.4.2009).
- Rogers, D. F. 2001. An Introduction to NURBS: With Historical Perspective. New York, Elsevier: 344 str.
- Rottensteiner, F., Clode, S. 2008. Building and road extraction by lidar and imagery. V: Shan, J., Toth, C. K. (ur.). Topographic laser ranging and scanning: principles and processing. New York, Taylor and Francis: 445-478.
- Rozman, I. 2009. Ali kdo v Sloveniji izvaja meritve akustične impedance tal na prostem? Ljubljana, Elektroinštitut Milan Vidmar, Oddelek za vplive elektroenergetskih naprav na okolje. 12. maj 2009. Osebna komunikacija.

- Šadl, M. 2001. Statistika za komercialiste. Murska Sobota, Ekonomska šola: 126 str.
- Sanchez, J. 2006. The accuracy of grid digital elevation models linearly constructed from scattered sample data. *International journal of geographical information science* 20, 2: 169-192.
- Santos, G., Rojey, L., Newbery, D. 2000. The environmental benefits from road pricing. Cambridge, University of Cambridge, Department of applied economics: 10 str.  
[www.econ.cam.ac.uk/dae/repec/cam/pdf/wp0020.pdf](http://www.econ.cam.ac.uk/dae/repec/cam/pdf/wp0020.pdf) (15.1.2007).
- Schmidtchen, D., Koboldt, C., Monheim, J., Will, B. E., Haas, G. 2008. The Internalisation of external costs in transport: the polluter pays to the cheapest cost avoider principle. German working papers in law and economics. Berkeley, ZDA, The Berkeley Electronic Press: 158 str.
- Selby, M.J. 1985. Earth's changing surface – an introduction to geomorphology. Oxford, Oxford University Press: 607 str.
- Shan, J., Sampath, A. 2005. Urban DEM generation from raw lidar data: a labelling algorithm and its performance. *Photogrammetric engineering and remote sensing* 71, 2: 217-226.
- Shan, J., Sampath, A. 2008. Building extraction from lidar point clouds based on clustering techniques. V: Shan, J., Toth, C. K. (ur.). *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. New York, Taylor and Francis: 421-444.
- Shan, J., Toth, C. K. (ur.). 2008. *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. New York, Taylor and Francis: 590 str.
- Shary, P., Sharaya, L., Mitusov, A. 2002. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma* 107: 1-32.
- Shekhar, S., Coyle, M., Goyal, B., Liu, D.-R., Sarkar, S. 1997. Data models in geographic information systems. *Communications of the ACM* 40, 4: 103-111.
- Sithole, G. 2005. Segmentation and classification of airborne laser scanner data. Doktorska disertacija. TU Delft. Publications on Geodesy of the Netherlands Commission of Geodesy 59: 184 str.
- Sithole, G., Vosselman, G. 2003. ISPRS Comparison of filters. Report.  
[www.itc.nl/isprswgiii%2d3/filtertest/report05082003.pdf](http://www.itc.nl/isprswgiii%2d3/filtertest/report05082003.pdf) (29.7.2009).
- Sithole, G., Vosselman, G. 2004. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 59: 85-101.
- Skrobo, D. 2004. Polinomna aproksimacija i interpolacija površine. Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva: 28 str.
- Sohlman, M., Jonasson, H., Gustafsson, A. 2004. Using Satellite data for the determination of the acoustic impedance of ground. SP Swedish National Testing and research institute report. Boras, Švedska. 43 f.
- Sohn, G., Huang, X., Tao, V. 2008. A data-driven method for modeling 3D building objects using a binary space partitioning tree. V: Shan, J., Toth, C. K. (ur.). *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. New York, Taylor and Francis: 479-510.
- Soininen, A. 2004. Ground classification. Jyväskylä, Finska, Terrasolid: 32 str.  
[www.terrasolid.fi/system/files/ground\\_classification\\_0.ppt](http://www.terrasolid.fi/system/files/ground_classification_0.ppt) (21.12.2008)

- Song, J.H., Han, S.H., Yu, K., Kim Y. 2002. Assessing the possibility of land-cover classification using lidar intensity data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 34, B3: 259-262.  
[www.isprs.org/commission3/proceedings02/papers/paper128.pdf](http://www.isprs.org/commission3/proceedings02/papers/paper128.pdf) (28.7.2009).
- Špes, M., Cigale, D., Gspan, P., Jug, A., Lampič, B. 2002. Regionalizacija Ljubljane z vidika hrupne obremenjenosti. Ljubljana, Inštitut za geografijo: 82 f.
- Špes, M., Cigale, D., Lampič, B., Natek, K., Plut, D., Smrekar, A. 2002. Študija ranljivosti okolja. *Geographica Slovenica* 35 (1-2): 150 str.
- SSKJ 1994. Slovar slovenskega knjižnega jezika. Ljubljana, Državna založba Slovenije: 1714 str.
- Stansfeld, S. A., Sharp, D. S., Gallacher, J., Babisch, W. 1993. Road traffic noise, noise sensitivity and psychological disorder. *Psychological Medicine* 23: 977-985.  
[www.nonoise.org/library/whonoise/whonoise.htm](http://www.nonoise.org/library/whonoise/whonoise.htm) (15.1.2009)
- Strand, H., Höft, R., Stritholt, J., Horning, N., Miles, L., Fosnight, E., Turner, W. (ur.) 2007. Sourcebook on remote sensing and biodiversity indicators. Montreal, Kanada, Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Technical Series 32: 203 str.
- Švab Lenarčič, A. 2009. Uporaba lidarskih podatkov za klasifikacijo pokrovnosti. Magistrska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 135 str.
- Tarsha-Kurdi, F., Landes, T., Grussenmeyer, P., Koehl, M. 2007. Model-driven and data-driven approaches using lidar data: Analysis and comparison. *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information science* 36, 3W49B: 87-92.
- Tchoukanski, I. 2009. Smooth polygons. ET GeoWizards Help.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. 1990. Applied geophysics. Cambridge, Cambridge University Press: 770 str.
- Thiele, A., Cadario, E., Schulz, K., Thönnessen, U., Soergel, U. 2007. Building recognition from multi-aspect high-resolution InSAR Data in urban areas. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing* 45, 11: 3583-3593.
- Thiessen, G. J. 1978. Disturbance of sleep by noise. *Journal of the Acoustical Society of America* 64: 216-222.
- Thoss, A. 2008. Products Validation report for the SAFNWC/PPS version 2008 (and 2.0). Swedish Meteorological and Hydrological Institute. 63 f.  
[pro.smhi.se/saf/SAF-NWC-CDOP-SMHI-PPS-SCI-VR-1\\_v2\\_1\\_1.pdf](http://pro.smhi.se/saf/SAF-NWC-CDOP-SMHI-PPS-SCI-VR-1_v2_1_1.pdf) (8.9.2009).
- Thoss, A. 2009. Products Validation report for the SAFNWC/PPS version 2009. Swedish Meteorological and Hydrological Institute. 34 f.  
[www.smhi.se/saf/SAF-NWC-CDOP-SMHI-PPS-SCI-VR-3\\_v2\\_2\\_2.pdf](http://www.smhi.se/saf/SAF-NWC-CDOP-SMHI-PPS-SCI-VR-3_v2_2_2.pdf) (8.9.2009).
- Toutin, T. 2003. Block bundle adjustment of Landsat 7 ETM+ images over mountainous areas. *Photogrammetric engineering and remote sensing* 69, 12: 1341-1349.
- Toutin, T. 2004. Comparison of stereo-extracted DTM from different high-resolution sensors: SPOT 5, EROS A, IKONOS II, and QuickBird. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing* 42, 10: 2121-2129.
- Van Maercke, D. 2007. Specifications for GIS-noise databases. Deliverable 4 of the Imagine project. 146 f.  
[www.imagine-project.org/bestanden/IMA01-TR060526-CSTB05\\_1.pdf](http://www.imagine-project.org/bestanden/IMA01-TR060526-CSTB05_1.pdf) (13.4.2008).

- Veljanovski, T. 2007. Zaznavanje sprememb na površju s podatki daljinskega zaznavanja. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo: 192 str.
- Verhoef, E. 1998. The implementation of marginal external cost pricing in road transport. Amsterdam, Tinbergen Institute: 24 str.  
[www.tinbergen.nl/discussionpapers/98091.pdf](http://www.tinbergen.nl/discussionpapers/98091.pdf) (11. 10. 2006).
- Vieux, B., Needham, S. 1993. Nonpoint-pollution model sensitivity to grid-cell size. *Journal of Water Resources Planning and Management* 119, 2: 141-157.
- Visvalingam, M., Herbert, S. 1999. A computer science perspective on the bendsimplify algorithm. *Cartography and Geographical Information Systems* 26, 4: 253-270.
- Vosselman, G. 2000. Slope based filtering of laser altimetry data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 33, B3-2: 935-942.
- Vrišer, I., 1995. Agrarna geografija. Ljubljana, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo, 218 str.
- Wang, Z., Muller, J-C. 1998. Line Generalization based on analysis of shape characteristics. *Cartography and Geographical Information Systems* 25, 1: 3-15.
- Wehr, A. Lohr, U. 1999. Airborne laser scanning – an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54, 2-3: 68-82.
- Wilmink, I. et al. 2006. Guidelines for the use of traffic models for noise mapping and noise action planning. Deliverable 7 of the Imagine project. 86 f.  
[www.imagine-project.org/bestanden/IMA02DR7-060531-TNO.12.pdf](http://www.imagine-project.org/bestanden/IMA02DR7-060531-TNO.12.pdf)
- Wilson, J. P., Gallant, J. C. (ur.). 2000. *Terrain analysis: principles and applications*. New York, John Wiley and Sons: 512 str.
- Wölfel et al. 2003a. Adaptation and revision of the interim noise computation methods for the purpose of strategic noise mapping. WP 3.1.1: Road traffic noise - Description of the calculation method. 12 f.  
[circa.europa.eu/Public/irc/env/noisedir/library?l=/material\\_mapping/recommended\\_computation/reports\\_interim/traffic\\_wps\\_1333/xps\\_description/\\_EN\\_1.0\\_&a=d](http://circa.europa.eu/Public/irc/env/noisedir/library?l=/material_mapping/recommended_computation/reports_interim/traffic_wps_1333/xps_description/_EN_1.0_&a=d) (12.10.2008)
- Wölfel et al. 2003b. Adaptation and revision of the interim noise computation methods for the purpose of strategic noise mapping. WP 3.1.3: Road traffic noise - Guidance on the application. 17 f.  
[circa.europa.eu/Public/irc/env/noisedir/library?l=/material\\_mapping/recommended\\_computation/reports\\_interim/traffic\\_wps\\_1333/xps\\_133\\_guidance/\\_EN\\_1.0\\_&a=d](http://circa.europa.eu/Public/irc/env/noisedir/library?l=/material_mapping/recommended_computation/reports_interim/traffic_wps_1333/xps_133_guidance/_EN_1.0_&a=d) (12.10.2008)
- Xu, F., Ya-Qui, J. 2007. Automatic reconstruction of building objects from multiaspect meter-resolution SAR images. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing* 45, 7: 2336-2353.
- Yokoyama, H., Chikatsu, H. 2006. Automatic break-line detection from laser scanner data using surface flatness. *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium* 36, 5. Dresden, Nemčija: 6 str.  
[www.isprs.org/commission5/proceedings06/paper/1251\\_Dresden06.pdf](http://www.isprs.org/commission5/proceedings06/paper/1251_Dresden06.pdf) (6.7.2009).
- Zakšek, K. 2006. Analiza vidnosti s prostorskim kotom odprtega neba. *Geografski vestnik* 78 (2): 97-109.
- Zakšek, K. 2007. Določitev temperature zraka iz modela temperature površja visoke prostorske in časovne ločljivosti. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo: 143 str.

- Zakšek, K., Oštir, K. 2008. Vpliv oblike reliefa na osončenost. V: Luthar, O., Dobrovoljc, H., Pavšek, M., Mulec, J., Fridl, J., Hrvatini, M. (ur.) Kras – trajnostni razvoj kraške pokrajine. Ljubljana, Založba ZRC: 312-316.
- Zhang, K., Whitman, D. 2005. Comparison of three algorithms for filtering airborne lidar data. *Photogrammetric engineering and remote sensing* 71, 3: 313-324.
- Zhang, K., Yan, J., Chen, S.-C. 2008. A framework for automated construction of building models from airborne lidar measurements. V: Shan, J., Toth, C. K. (ur.). *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. New York, Taylor and Francis: 511-534.

## Uredbe in zakoni

- Direktiva 1999/62/ES Evropskega parlamenta in sveta z dne 17. junija 1999 o cestnih pristojbinah za uporabo določene infrastrukture za težka tovorna vozila. UL EU št. L 187/42.
- Direktiva 2002/49/ES Evropskega parlamenta in sveta z dne 25. junija 2002 o ocenjevanju in upravljanju okoljskega hrupa. UL EU št. L 189/12: 101-115.
- Direktiva 2004/52/ES Evropskega parlamenta in sveta z dne 29. aprila 2004 o interoperabilnosti elektronskih cestninskih sistemov v Skupnosti. UL EU št. L 166/124: 856-863.
- Direktiva 2006/38/ES Evropskega parlamenta in sveta z dne 17. maja 2006 o spremembi Direktive 1999/62/ES o cestnih pristojbinah za uporabo določene infrastrukture za težka tovorna vozila. UL EU št. L 157/8.
- Uredba o uvedbi in uporabi enotne klasifikacije vrst objektov in o določitvi objektov državnega pomena. UL RS št. 33/2003: 3868 (78/2005: 8363 popravek).
- Uredba o mejnih vrednostih kazalnikov hrupa v okolju z dne 23. novembra 2005. UL RS št. 105/2005: 11025-11046.





## 11 PRILOGE

PRILOGA A: Programska oprema in viri podatkov

PRILOGA B: Kazalnika hrupa  $L_{DVN}$  ( $L_{DEN}$ ) in  $L_{noč}$  ( $L_{night}$ )

PRILOGA C: Fresnelove cone

PRILOGA D: Karte razlik v ravneh zvoka

## PRILOGA A: PROGRAMSKA OPREMA IN VIRI PODATKOV

V okviru študije sem uporabil različne podatke, zapisane v raznolikih zapisih, zato sem uporabil naslednjo programsko opremo:

- ITT IDL 7.0 in ENVI 4.5 z moduli Feature Extraction, Lidar in Sky view factor (avtorja K. Zakšek in K. Oštir) (segmentna klasifikacija posnetkov DOF, pretvorba oblaka laserskih točk v rastrsko obliko in izračun deleža vidnega neba),
- ESRI ArcGIS 9.3 (obdelava in integracija podatkov ter kartiranje rezultatov),
- ET GeoWizards 9.9 (samodejna obdelava vektorjev), avtor I. Tchoukanski,
- Microsoft Excel 2003 (priprava grafikonov ter statistična analiza in priprava podnebnih podatkov, podatkov o številu prometa, višin),
- UltraEdit Professional 14.0 (priprava in urejanje vhodnih podatkov in izhodnih podatkov o ravneh zvoka v besedilnem zapisu),
- Leica Photogrammetry Suite 9.1 (priprava podatkov o reliefu in filtriranje rastrskih podatkovnih slojev),
- Cloud Peak LASEdit (brezplačna predstavljena različica) (prikazovanje oblaka laserskih točk),
- International Hurricane Research Center ALDPAT 1.0 (preverjanje delovanja različnih algoritmov filtriranja oblaka laserskih točk),
- REIN (filtriranje oblaka laserskih točk in izdelava digitalnega modela višin), avtor A. Kobler,
- Clark Labs Idrisi 15 (pretvorba izhodnih datotek REIN v zapis Erdas Imagine image),

- LASTools (preoblikovanje laserskih podatkov v zapisu LAS), avtor M. Isenburg,
- TerraSolid TerraScan in TerraModeler (filtriranje oblaka laserskih točk, preverjanje in upravljanje z laserskimi podatki), in
- Braunstein + Berndt GmbH SoundPLAN LLC 6.5 (modeliranje ravni zvoka).

V procesih modeliranja in analiz sem uporabil podatke naslednjih podjetij in ustanov:

- Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti,
- Podjetje Flycom, družba za letalske in komunikacijske storitve d.o.o.,
- Geodetska uprava Republike Slovenije, 2005-2009,
- Agencija za okolje Republike Slovenije, 2000-2009,
- Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano, 2008,
- Direkcija Republike Slovenije za ceste, 2007,
- Ministrstvo za notranje zadeve, 2009, in
- Podjetje PNZ svetovanje projektiranje d.o.o.

## PRILOGA B: KAZALNIKA HRUPA $L_{DVN}$ ( $L_{DEN}$ ) IN $L_{NOČ}$ ( $L_{NIGHT}$ )

V skladu z Evropsko direktivo o hrupu 2002/49/ES sta postala standardna kazalnika hrupa  $L_{DVN}$  (raven glasnosti zvoka dan-večer-noč) za oceno motnje in  $L_{noč}$  (nočna raven glasnosti zvoka) za oceno motnje spanca. Raven  $L_{DVN}$  v decibelih (dB) je opredeljena z naslednjo formulo:

$$L_{DVN} = 10 \cdot \log \frac{1}{24} \left( 12 \cdot 10^{\frac{L_{dan}}{10}} + 4 \cdot 10^{\frac{L_{večer}+5}{10}} + 8 \cdot 10^{\frac{L_{noč}+10}{10}} \right)$$

kjer:

- dan traja 12 ur (od 7:00 do 19:00<sup>30</sup>), večer štiri (od 19:00 do 23:00) in noč osem ur (od 23:00 do 7:00),
- je leto ustrezno leto glede emisije zvoka in povprečno leto glede meteoroloških okoliščin;

kjer je:

- upoštevan vpadni zvok, kar pomeni, da se ne upošteva zvok, ki se odbije od fasade obravnavanega bivališča (kot splošno pravilo, to v primeru meritev pomeni popravek 3 dB).

Višina točke ocenjevanja  $L_{DVN}$  je odvisna od uporabe:

- v primeru računanja za namene strateškega kartiranja hrupa<sup>31</sup> glede na izpostavljenost hrupu v zgradbah in njihovi bližini morajo biti točke ocenjevanja 4,0

---

<sup>30</sup> Za začetek dneva (in posledično začetek večera in začetek noči) so zapisane privzete vrednosti. Države članice lahko pričetek dneva prilagodijo svojim potrebam, v Sloveniji velja šesta ura zjutraj.

$\pm 0,2$  m (3,8 do 4,2 m) nad tlemi in pred najbolj izpostavljenim delom fasade; najbolj izpostavljen del fasade bo zato zunanji zid, ki je najbližji v smeri določenega vira hrupa; za druge namene so lahko izbrane druge možnosti,

- v primeru meritev za namen strateškega kartiranja hrupa glede na izpostavljenost hrupu v zgradbah in njihovi bližini so lahko izbrane tudi druge višine, ki ne smejo nikoli biti nižje od 1,5 m nad tlemi, rezultati pa se morajo popraviti skladno z ustrezno višino 4 m,
- za druge namene, kot sta akustično planiranje in določanje stopenj hrupa, so lahko izbrane druge višine, ki ne smejo nikoli biti nižje od 1,5 m nad tlemi, na primer za:
  - podeželska območja z enonadstropnimi hišami,
  - načrtovanje lokalnih ukrepov za zmanjšanje vpliva hrupa na določena bivališča,
  - podrobno kartiranje hrupa na omejenem območju, ki prikazuje izpostavljenost hrupu posameznega bivališča.

#### Opredelitev kazalnika hrupa za nočni čas

Kazalnik hrupa za nočni čas  $L_{noč}$  je A-vrednotena dolgoročna povprečna raven hrupa, kot je določeno v ISO 1996-2: 1987, določeno za vsa nočna obdobja v letu;

kjer:

- traja noč osem ur,
- je leto ustrezno leto glede emisije zvoka in povprečno leto glede meteoroloških okoliščin,
- je upoštevan vpadni zvok,
- je točka ocenjevanja enaka kot za  $L_{DfN}$ .

---

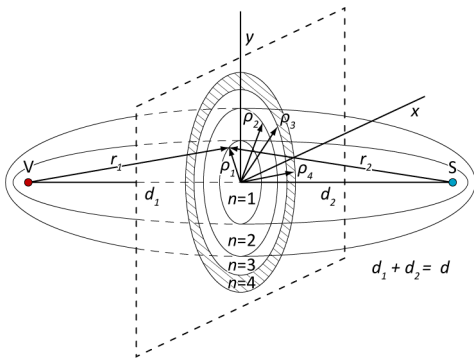
<sup>31</sup> Strateška karta hrupa je po evropski direktivi o hrupu 2002/49/ES karta, namenjena splošni oceni o izpostavljenosti hrupu na določenem območju zaradi različnih virov hrupa ali za celovito napoved za takšno območje. Je standardiziran grafičen prikaz stanja obremenjenosti okolja s hrupom na določenem območju.

## PRILOGA C: FRESNELOVE CONE

Fresnelovi elipsoidi so rotacijski elipsoidi z goriščema v viru in sprejemniku valovanja, ki jih določimo po kriteriju

$$r_1 + r_2 - d = \frac{n \cdot \lambda}{2}$$

Pri tem so  $r_1$  razdalja med sprejemnikom in točko na zunanjem polmeru  $n$ -te Fresnelove cone,  $r_2$  razdalja med virom in točko na zunanjem polmeru  $n$ -te Fresnelove cone,  $d$  razdalja med virom in sprejemnikom,  $n$  število Fresnelove cone in  $\lambda$  valovna dolžina valovanja (slika 100). Fresnelovi elipsoidi v poševni ravnini izsekajo elipse, na ravnini, ki stoji pravokotno na zveznici med virom in sprejemnikom, pa kroge. Kolobarno površino med krogi imenujemo Fresnelovi krožni kolobarji ali Fresnelove cone (spodnja slika, označeno s šrafuro).



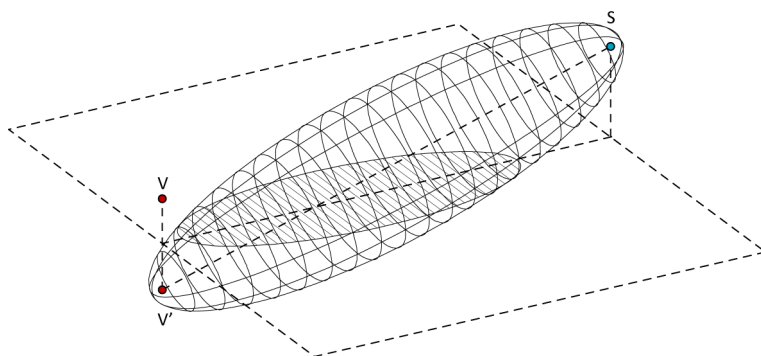
Slika 100: Prikaz Fresnelovih elipsoidov in kolobarjev (con). Četrta cona je šrafirana (prirejeno po Budin 1975, 20).

Figure 100: Fresnel ellipsoids and zones. The fourth zone is hatched (Budin 1975, 20).

Fresnelova cona je funkcija valovne dolžine valovanja ter razdalj od točke na ravni črti med virom in sprejemnikom do vira in sprejemnika:

$$\rho_n = \sqrt{n \cdot \lambda \cdot \frac{d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2}}$$

Pri tem so  $\rho_n$  zunanji polmer n-te Fresnelove cone v metrih,  $d_1$  razdalja med točko računanja polmera cone in virom in  $d_2$  razdalja med točko računanja polmera cone in sprejemnikom. Največji polmer prve Fresnelove cone ( $\rho_{1max}$ ) je na polovici med sprejemnikom in virom valovanja  $\rho_{1max} = (\sqrt{\lambda \cdot d})/2$ . Vsi Fresnelovi kolobarji imajo enako površino, saj je širina kolobarja obratno sorazmerna srednjemu polmeru kolobarja. Jakost polja prve Fresnelove cone je dvakrat večja od skupnega polja vseh ostalih con (Budin 1975, 20-23). Pri računanju širjenja zvoka z metodo Harmonoise je pri odboju zvokovnega polja od ravne površine eliptična Fresnelova cona definirana kot presečišče med ravnino ploskve in Fresnelovim elipsoidom z goriščema v zrcalni sliki točke vira V' in točki sprejemnika S, kot prikazuje spodnja slika (Nota et al. 2005, 33).

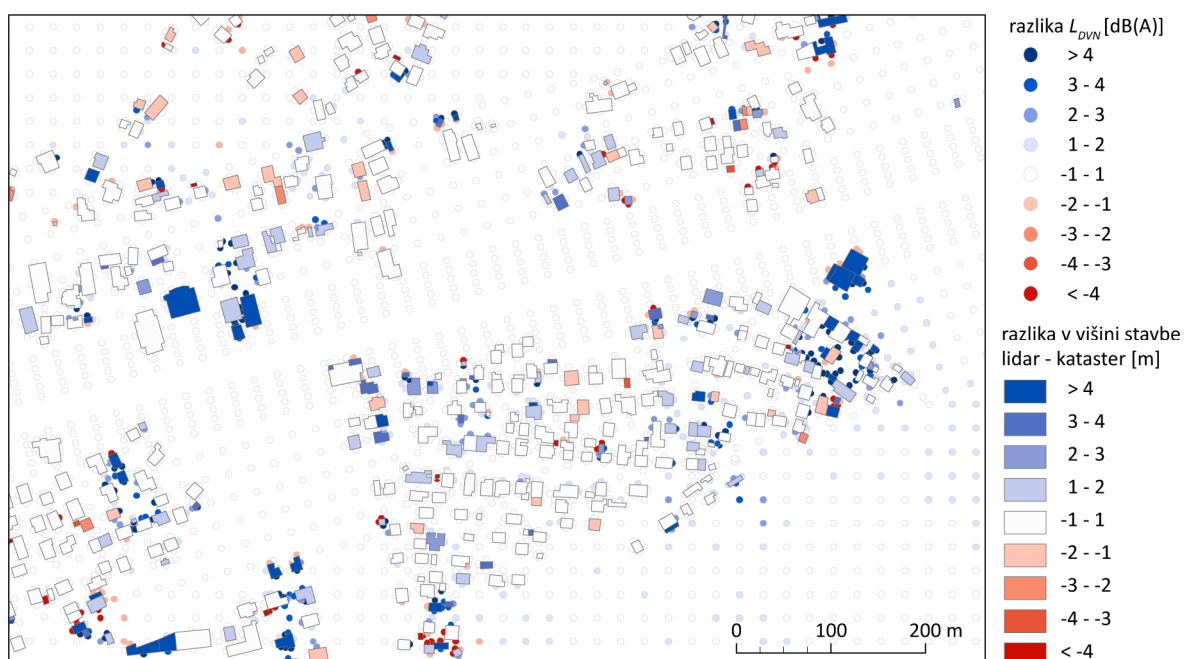


Slika 101: Fresnelov elipsoid in cona (šrafirano), kot je definirana v metodi računanja širjenja zvoka Harmonoise (prirejeno po Nota et al. 2005, 33).

Figure 101: The Fresnel ellipsoid and zone as defined in Harmonoise noise calculation method (Nota et al. 2005, 33).

## PRILOGA D: KARTE RAZLIK V RAVNEH ZVOKA

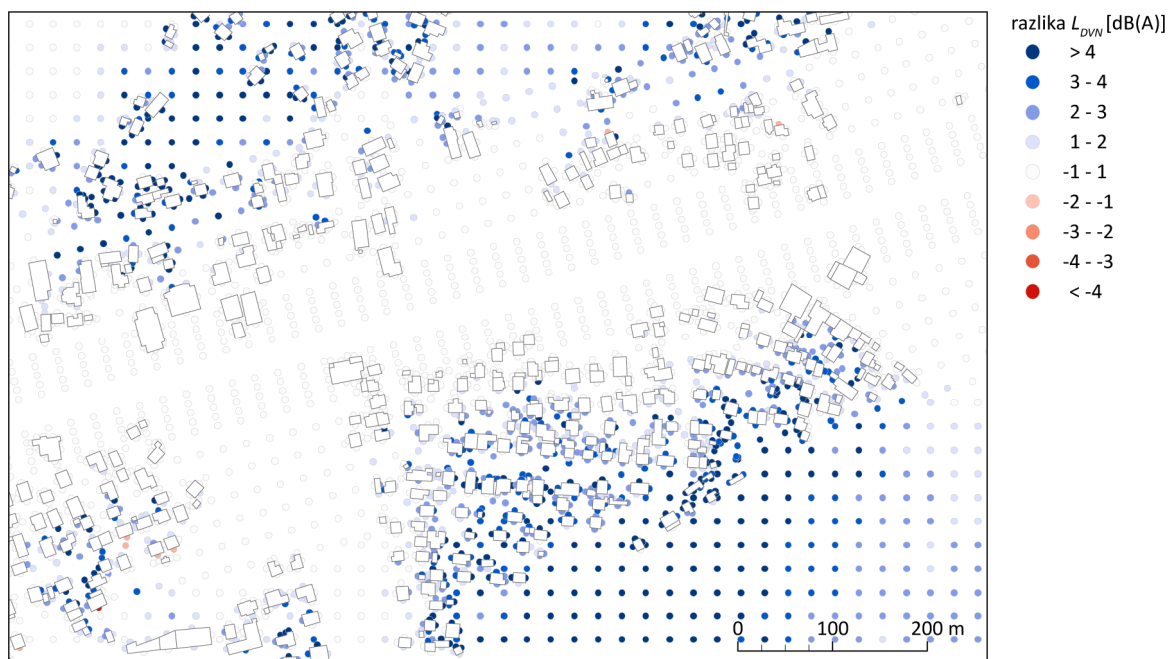
Podpora poglavju 5.2. Karte razlik v ravneh zvoka  $L_{DfN}$  med referenčnimi izračunom in izračuni, ki upoštevajo različne podatke.



Slika 102: Karta razlik v ravni jakosti zvoka med referenčnim izračunom in izračunom z višinami slemena stavb iz katastra. V barvni lestvici so prikazane tudi razlike v višinah stavb med podatki laserskega skeniranja in katastrom stavb.

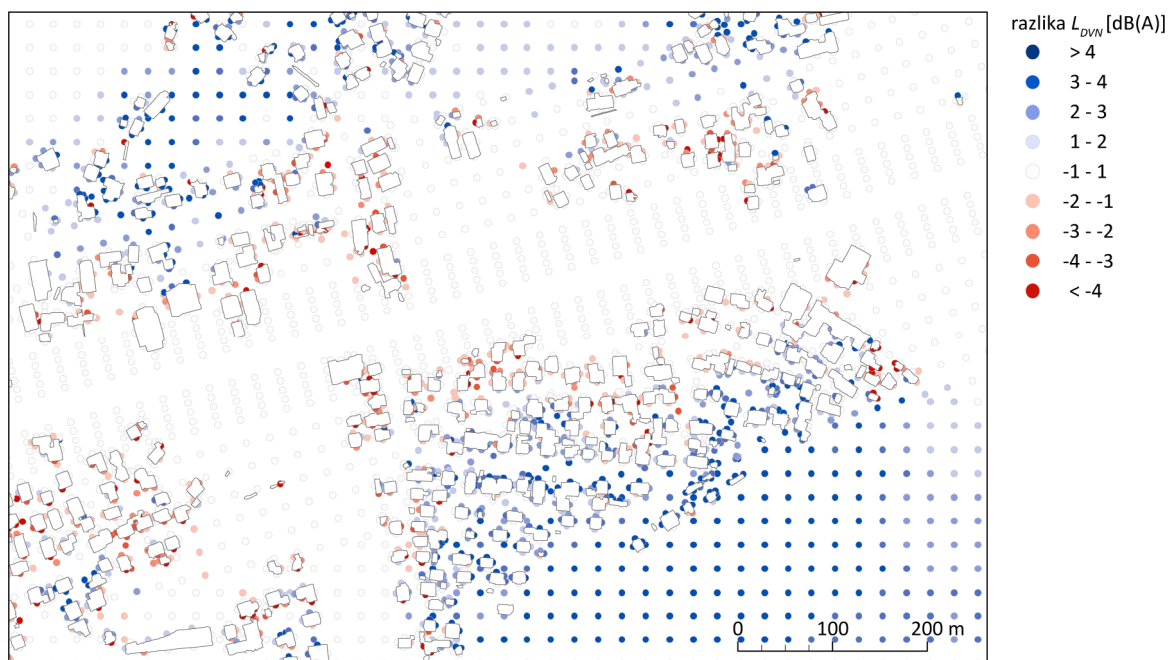
Figure 102: A map of noise differences in the reference calculation and a calculation with cadastral buildings' heights, and height differences of buildings in lidar and cadastral data.





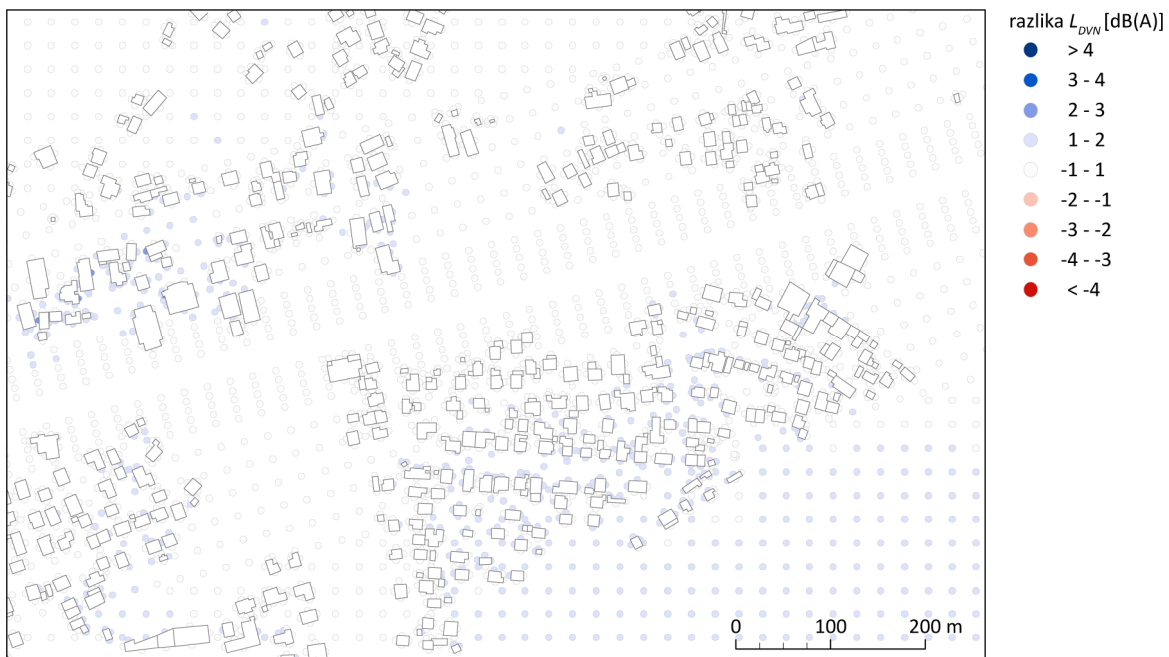
Slika 103: Karta razlik v ravni jakosti zvoka med referenčnim izračunom in izračunom z višinami kapi stavb iz podatkov laserskega skeniranja.

Figure 103: A map of noise differences in the reference calculation and a calculation with eave heights derived from lidar data.



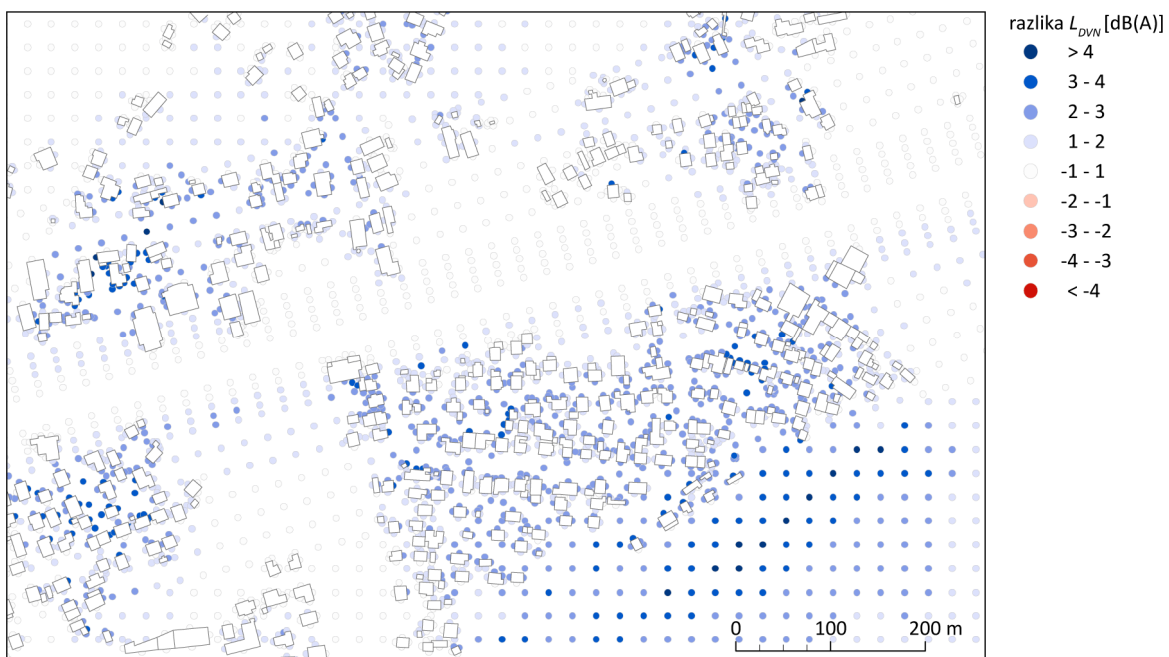
Slika 104: Karta razlik v ravni jakosti zvoka med referenčnim izračunom in izračunom z obodi stavb in njihovimi višinami kapi iz podatkov laserskega skeniranja.

Figure 104: A map of noise differences in the reference calculation and a calculation with building footprints and their eave heights from lidar data.



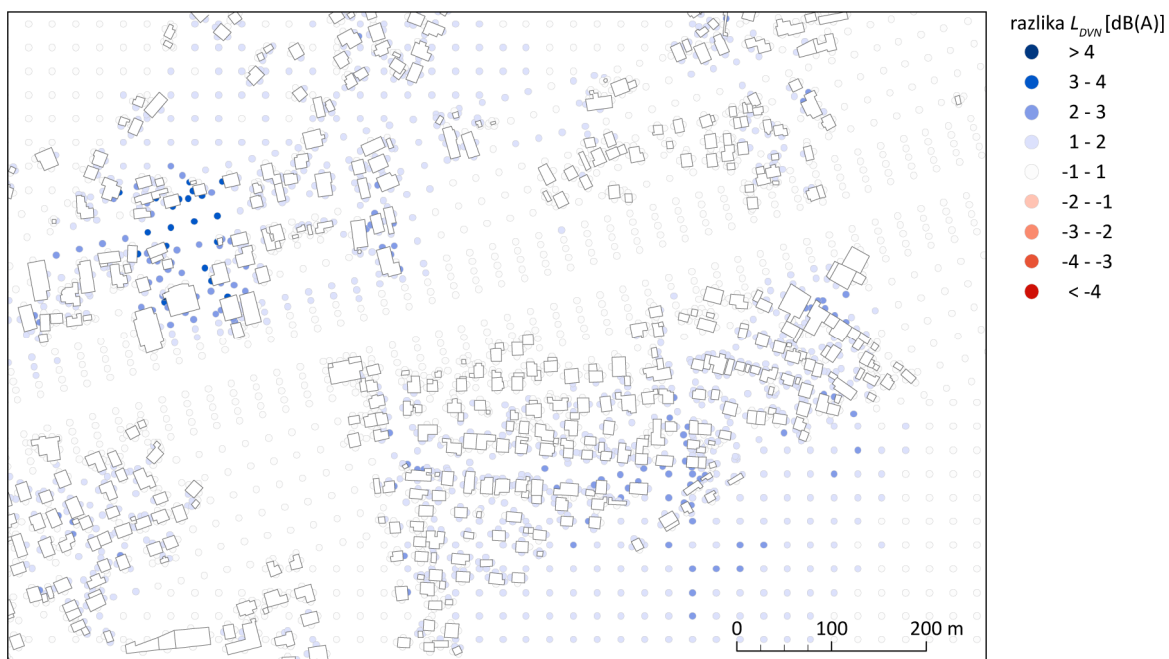
Slika 105: Karta razlik v ravni jakosti zvoka med referenčnim izračunom in izračunom z akustično impedanco, pridobljeno iz karte pokrovnosti (pol)samodejne klasifikacije podatkov laserskega skeniranja.

Figure 105: A map of noise differences in the reference calculation and a calculation with acoustic impedance data derived from a land cover map made with an (semi)automatic classification of lidar data.



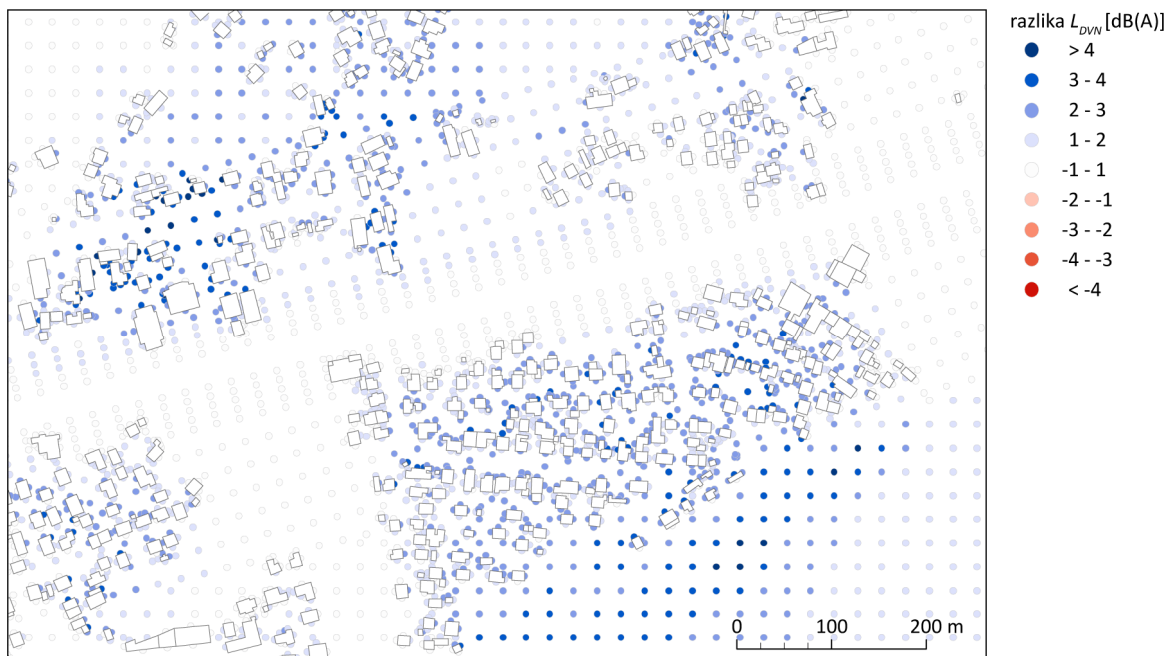
Slika 106: Karta razlik v ravni jakosti zvoka med referenčnim izračunom in izračunom z akustično impedanco, pridobljeno iz karte pokrovnosti (pol)samodejne klasifikacije posnetkov Landsat.

Figure 106: A map of noise differences in the reference calculation and a calculation with acoustic impedance data derived from a land cover map made with an (semi)automatic classification of Landsat satellite data.



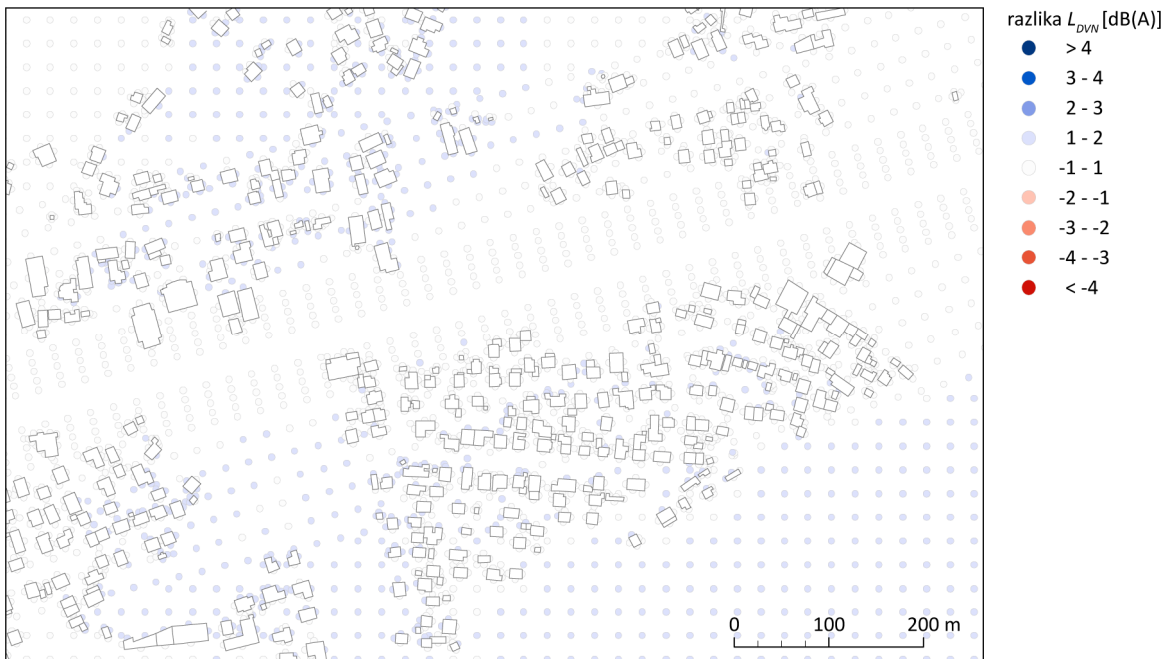
Slika 107: Karta razlik v ravni jakosti zvoka med referenčnim izračunom in izračunom z akustično impedanco, pridobljeno iz karte pokrovnosti (pol)samodejne objekte klasifikacije ortofoto posnetkov.

Figure 107: A map of noise differences in the reference calculation and a calculation with acoustic impedance data derived from a land cover map made with an (semi)automatic object based orthophoto classification.



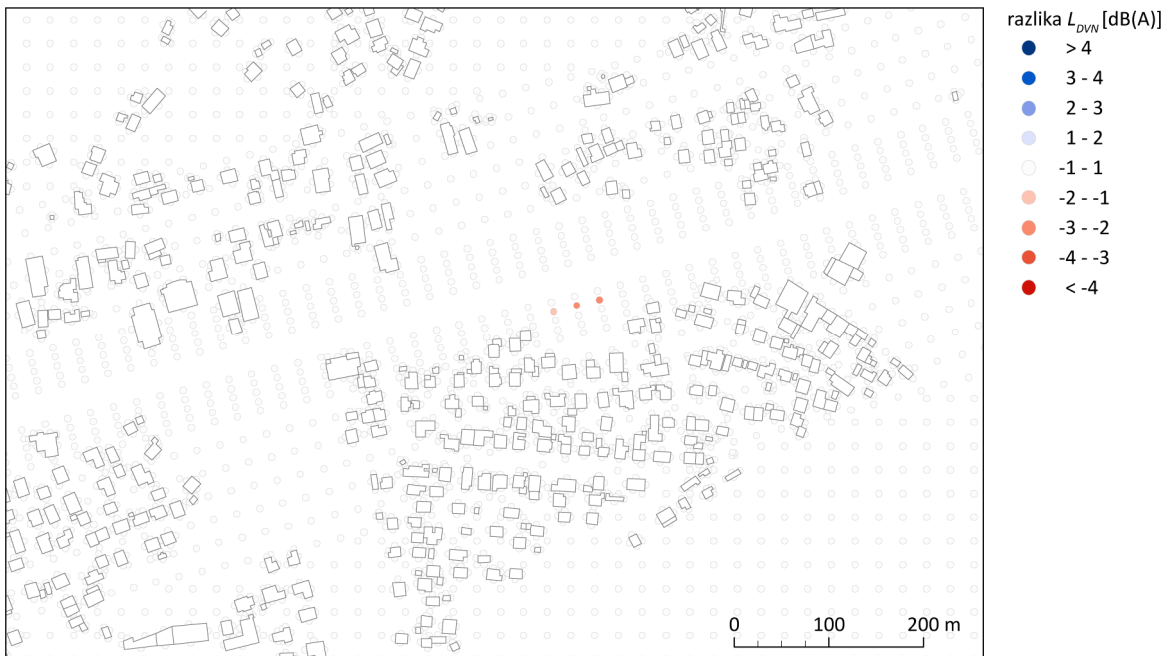
Slika 108: Karta razlik v ravni jakosti zvoka med referenčnim izračunom in izračunom z akustično impedanco, pridobljeno iz karte rabe tal oziroma pokrovnosti MKGP.

Figure 108: A map of noise differences in the reference calculation and a calculation with acoustic impedance data derived from a MKGP land use/land cover map.



Slika 109: Karta razlik v ravni jakosti zvoka med referenčnim izračunom in izračunom z akustično impedanco, pridobljeno iz karte rabe tal oziroma pokrovnosti Corine.

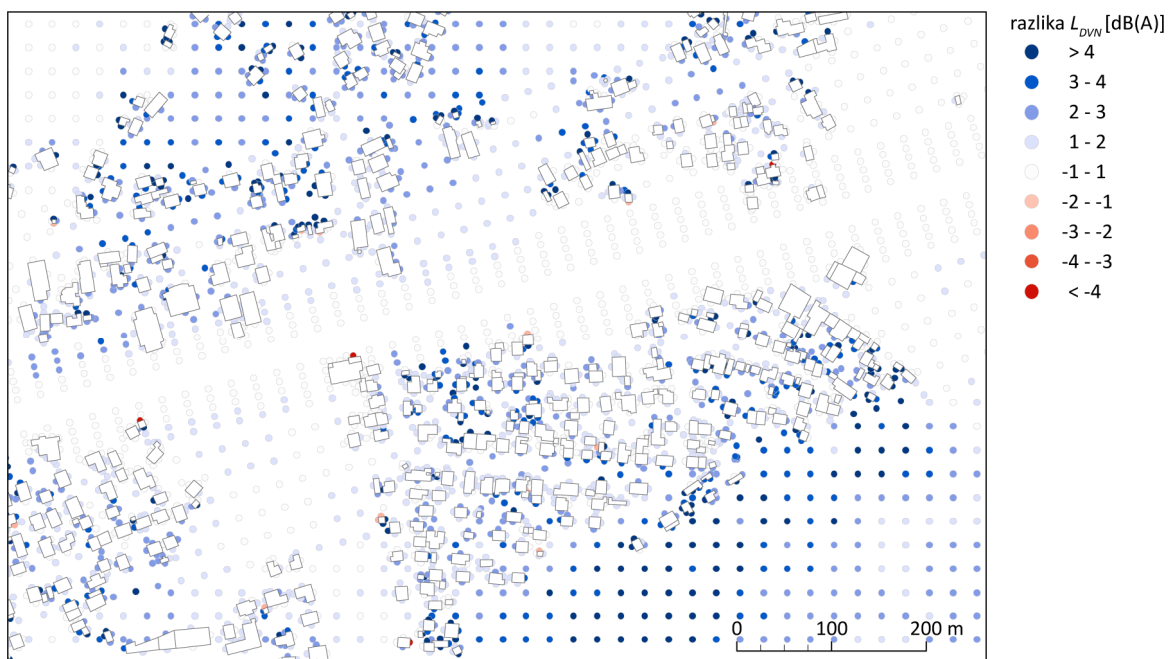
Figure 109: A map of noise differences in the reference calculation and a calculation with acoustic impedance data derived from a Corine land use/land cover map.



Slika 110: Karta razlik v ravni jakosti zvoka med referenčnim izračunom in izračunom z upoštevanimi lomnimi linijami.

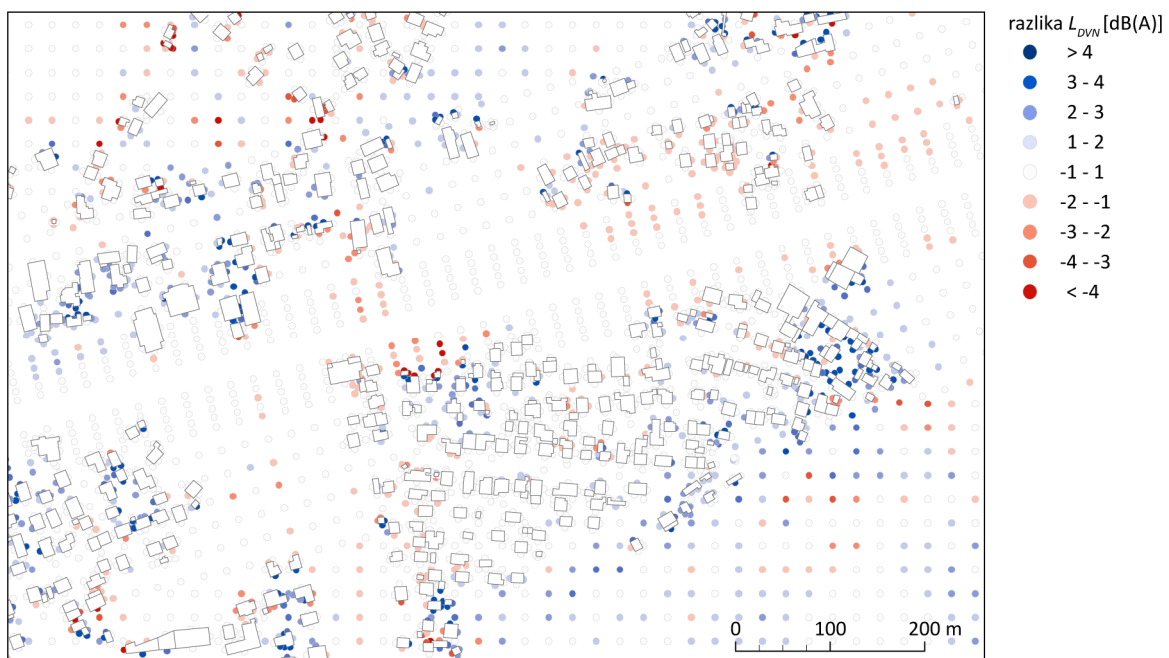
Figure 110: A map of noise differences in the reference calculation and a calculation considering relief brake lines.





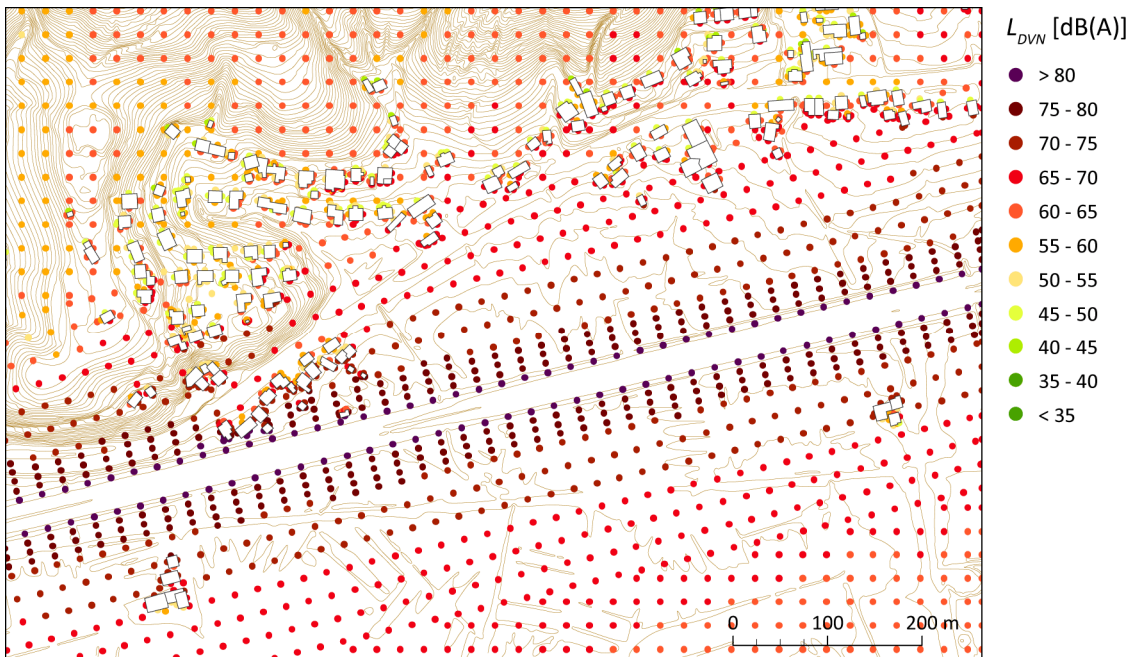
Slika 111: Karta razlik v ravni jakosti zvoka med referenčnim izračunom in izračunom z višino sprejemnikov 4 m.

Figure 111: A map of noise differences in the reference calculation and a calculation considering 4 m receivers height.



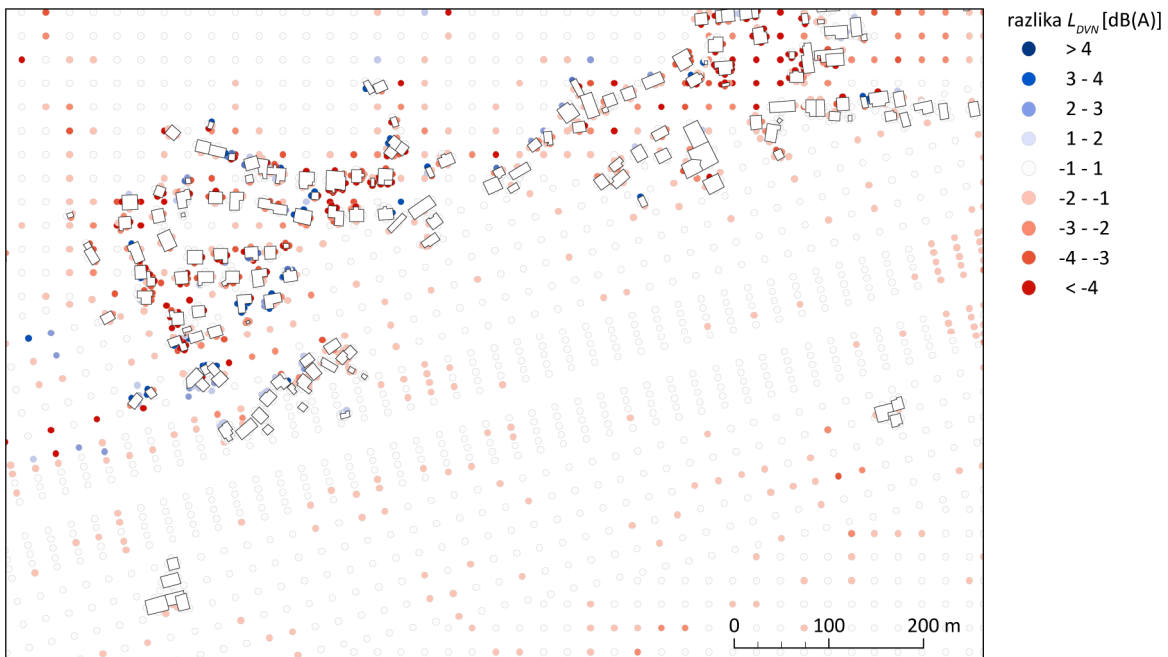
Slika 112: Karta razlik v ravni jakosti zvoka med referenčnim izračunom in izračunom s podatki GURS in brez upoštevanje impedance.

Figure 112: A map of noise differences in the reference calculation and a calculation with GURS data and without considering the acoustic impedance.



Slika 113: Karta ravni jakosti zvoka za referenčni izračun za ožje študijsko območje O1. Tanke rjave črte so metrske lidarske plastnice.

Figure 113: A reference data noise map of O1 test site. Thin brown lines are lidar derived 1 m contours.



Slika 114: Karta razlik v ravni jakosti zvoka med referenčnim izračunom in izračunom s podatki GURS za ožje študijsko območje O1.

Figure 114: A map of noise differences in the reference calculation and a calculation with GURS data for the O1 test site.