

VIŠJA STROKOVNA ŠOLA ACADEMIA,
MARIBOR

DIPLOMSKO DELO

PRIMERJAVA POSTOPKOV ZA MERJENJE ZGOŠČENOSTI ASFALTNIH PLASTI

ELEKTROMAGNETNA SONDA

Kandidat: Stojan Ferlič

Študent študija ob delu

Številka indeksa: 11190122716

Program: Gradbeništvo

Mentorja: Bojan Dapčević, univ. dipl. inž. grad.

mag. Bojana Lukač, univ. dipl. inž. kem. teh.

Maribor, junij 2011

IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Podpisani Stojan Ferlič, z vpisno številko 11190122716, izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom:

PRIMERJAVA POSTOPKOV ZA MERJENJE ZGOŠČENOSTI ASFALTNIH PLASTI - ELEKTROMAGNETNA SONDA

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- je predloženo diplomsko delo izključno rezultat mojega dela;
- sem poskrbel, da so dela in mnenja drugih avtorjev, ki jih uporabljam v predloženem delu, navedena oz. citirana skladno s pravili Višje strokovne šole Academia;
- se zavedam, da je plagiatorstvo – predstavljanje tujih del oz. misli kot moje lastne – kaznivo po Zakonu o avtorskih in sorodnih pravicah (Ur. l. RS 16/2007, v nadaljevanju ZAPS), prekršek pa podleže tudi ukrepom VSŠ Academia, skladno z njenimi pravili;
- skladno z 32. a členom ZAPS dovoljujem VSŠ Academia dajanje avtorskega dela na voljo javnosti z objavo diplomskega dela na elektronskem mediju, tj. e-portalu šole.

Maribor, junij 2011

Podpis:

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju Višje strokovne šole Academia, g. Bojanu Dapčeviću, za pomoč in izkazano zaupanje ob mentorstvu ter mentorici na Zavodu za gradbeništvo, ge. Bojani Lukač, za strokovno pomoč in svetovanje pri pisanju diplomskega dela.

Prav tako se zahvaljujem Zavodu za gradbeništvo Slovenije, ki mi je omogočilo študij na Višji strokovni šoli Academia Maribor.

Zahvaljujem se tudi lektorici, Metki Gselman Sedak, prof., ki je lektorirala moje diplomsko delo.

Nazadnje gre največja zahvala mojim staršem in prijateljem za potrpežljivost ter moralno podporo med celotnim študijem.

POVZETEK

Za zagotovitev kakovostnega, trajnega asfaltnega vozišča za optimalno udobno vožnjo uporabnikov cest je potrebno upoštevati različne dejavnike. Začne se že s samim projektiranjem ceste, kjer je potrebno izbrati ustrezne bituminizirane zmesi za določen namen uporabe. Nadaljuje se v tovarni asfalta, kjer se bituminizirana zmes proizvede. Za doseganje optimalne trajnosti ceste pa je potrebno izbrano bituminizirano zmes tudi kakovostno vgraditi. Pri vgradnji je zelo pomembno, da bituminizirano zmes pravilno zgostimo. Pomembno je, da sproti ob vgrajevanju na gradbišču spremljamo enakomernost in stopnjo zgoščenosti na še vroče vgrajene asfaltne plasti.

V ta namen se je do sedaj uporabljala nedestruktivna metoda za merjenje zgoščenosti z izotopsko sondo. Problematika te metode je predvsem v načinu delovanja izotopske sonde, ki deluje na principu odboja radioaktivnih žarkov. Zahteve zakonodaje za skladiščenje, prevoz in uporabo naprav, ki oddajajo ionizirajoče sevanje, so zelo stroge, delavci pa so zaradi varovanja zdravja podvrženi posebnemu zdravniškemu nadzoru.

Iz teh razlogov se je pojavila težnja po novi metodi merjenja zgoščenosti asfaltne plasti. Proizvajalci so tako razvili elektromagnetno sondo, ki deluje na principu dielektričnosti materialov. Za delo z elektromagnetno sondo ni potrebno nikakršnih dodatnih izobraževanj in dragih postopkov pridobivanja ustreznih dovoljenj. Zaradi drugačnega principa merjenja je delo tudi veliko lažje, hitrejše ter posledično tudi cenejše. Kljub nekaterim težavam so rezultati meritev z elektromagnetno sondo ob pravilni uporabi primerljivi z do sedaj poznanimi metodami za določanje zgoščenosti asfaltne plasti.

Ključne besede: bituminizirana zmes, asfaltna plast, zgoščenost, izotopska sonda, elektromagnetna sonda.

ABSTRACT

To ensure the quality and the long-lasting of asphalt pavements to ensure optimal comfort of road users, it is necessary to consider various factors. It starts at the beginning of the road design, where it is necessary to select the correct bituminous mixture for a particular purpose of use. The asphalt plant must be able to produce the selected type of bituminous mixture. The transport of mixture to the construction site must be suitable. At the paving of asphalt mixture it is important to compact the layer to correct density. That's why it is important to continuously monitor the compaction of asphalt in situ.

For this purpose, a nondestructive method with nuclear gauge was used so far. The problem of this method is mainly in the way of radioactive gauge works. It operates on the principle of reflection of radioactive rays.

The requirements for storage, transport and handling of nuclear gauges are very strict. Persons which work with nuclear gauges are taken with a special medical supervision.

Therefore, there was a tendency for a new method of measuring density of asphalt layers. Manufacturers have developed an electromagnetic gauge, which operates on the principle of dielectric constant of materials. There is no need of any additional trainings and expensive procedures to work with electromagnetic gauge. Due to different measuring principle, the work is also much easier, faster and therefore cheaper. Despite some difficulties, the results of measurements with an electromagnetic gauge, when used correctly, are comparable with the other known methods for determining the density of asphalt layers.

Key words: bituminous mixture, the asphalt layer, density, radioactive gauge, electromagnetic gauge.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	9
1.1	Opredelitev obravnavane zadeve	9
1.2	Namen, cilji in osnovne trditve	9
1.3	Predpostavke in omejitve raziskave.....	10
1.4	Predvidene metode raziskovanja	10
2	BITUMINIZIRANA ZMES	12
2.1	Kaj je asfalt	12
2.1.1	Zmes kamnitih zrn	13
2.1.2	Bitumen	14
2.1.3	Dodatki v vezivu.....	15
2.1.4	Ostali dodatki.....	15
2.1.5	Vrste bituminiziranih zmesi.....	15
2.2	Vgradnja bituminizirane zmesi	17
2.2.1	Splošno	17
3	ZGOŠČENOST BITUMINIZIRANE ZMESI	21
3.1	Splošno.....	21
3.1.1	Princip zgoščanja bituminizirane zmesi	22
3.2	Določanje stopnje zgoščenosti	23
3.2.1	Določanje gostote bituminizirane zmesi v laboratoriju	25
3.3	Izotopski merilnik za merjenje zgoščenosti	27
3.3.1	Umeritvena (regresijska) premica	29
4	NOVA METODA ZA MERJENJE ZGOŠČENOSTI PLASTI.....	31
4.1	Elektromagnetna sonda	32
4.1.1	Zgodovina	32
4.2	Tip elektromagnetne sonde	33
4.3	Način delovanja	35
4.4	Priprava sonde in načini izvajanja meritev	35
5	EKSPERIMENTALNI DEL	38
5.1	Program dela	38
5.2	Obdelava rezultatov	41
5.2.1	Ponovljivost meritev	41

5.2.2	Primerjava med različnimi metodami določanja zgoščenosti plasti.....	42
5.2.3	Elektromagnetna sonda Trans Tech PQI 380	50
5.3	Vplivi na rezultate merjenja.....	51
5.3.1	Vlaga.....	51
5.3.2	Elektromagnetni dejavniki v okolju	52
5.3.3	Površina asfaltne plasti	53
6	ANALIZA REZULTATOV	56
7	ZAKLJUČEK	58
8	LITERATURA IN VIRI.....	61

KAZALO SLIK

Slika 1:	Tipični primer tovarne asfalta	13
Slika 2:	Naravni strjen bitumen	14
Slika 3:	Različne vrste bituminiziranih zmesi	16
Slika 4:	Pripravljena, pobrizgana podlaga pred asfaltiranjem	18
Slika 5:	Razdelilnik (finišer)	19
Slika 6:	Vgrajevanje bituminizirane zmesi.....	19
Slika 7:	Valjanje asfaltne plasti za finišerjem	21
Slika 8:	Stabilnost materiala v odnosu z zgoščenostjo	22
Slika 9:	Udarni zgoščevalnik in kalupi za izdelavo preskušanca	26
Slika 10:	Izotopska sonda Troxler	28
Slika 11:	Trans Tech PQI (1998).....	32
Slika 12:	Shema elektromagnetne sonde Troxler 2701-B	34
Slika 13:	Kovček za prenašanje elektromagnetne sonde.....	36
Slika 14:	Primer meritev zgoščenosti neposredno na vrtinah ($\Phi 150\text{mm}$).....	37
Slika 15:	Troxler 4640-B.....	39
Slika 16:	Troxler 3440.....	39
Slika 17:	Troxler Pave Tracker Plus 2701-B.....	40
Slika 18:	Trans Tech PQI 380	40
Slike 19:	Meritve na isti točki z izotopsko in elektromagnetno sondo ter izvrtano asfaltno jedro	43
Slika 20:	Nehomogena površina asfaltne plasti.....	54

KAZALO RAZPREDELNIC

Razpredelnica 1: Terenski in laboratorijski rezultati za kalibracijo izotopske sonde	29
Razpredelnica 2: Meritve z elektromagnetno sondo na isti točki.....	41
Razpredelnica 3: Meritve zgoščenosti na isti točki s premikanjem elektromagnetne sonde....	41
Razpredelnica 4: Meritve zgoščenosti na isti točki s izklopom in vklopom	42
Razpredelnica 5: Primerjava rezultatov zgoščenosti in votlavosti med elektromagnetno in izotopsko sondo ter asfaltnimi jedri na AC 16 surf	44
Razpredelnica 6: Primerjava rezultatov zgoščenosti in votlavosti med elektromagnetno in izotopsko sondo ter asfaltnimi jedri na AC 22 bin	46
Razpredelnica 7: Primerjava rezultatov zgoščenosti in votlavosti med elektromagnetno in izotopsko sondo ter asfaltnimi jedri na AC 22 bin	48
Razpredelnica 8: Primerjava specifične gostote med različnimi metodami na AC 32 base	50
Razpredelnica 9: Rezultati meritev z elektromagnetno sondo na mokri površini	51
Razpredelnica 10: Rezultati meritev z izotopsko sondo na mokri površini	52
Razpredelnica 11: Rezultati vrtin in elektromagnetne sonde na nehomogeni asfaltni površini	53
Razpredelnica 12: Primerjava rezultatov zgoščenosti vrtin in sondnih impulzov na nehomogeni površini	55

KAZALO GRAFOV

Graf 1: Primer umeritvene (kalibracijske) premice	30
Graf 2: Primerjava zgoščenosti na AC 16 surf	45
Graf 3: Primerjava vsebnosti votlin na AC 16 surf	45
Graf 4: Primerjava zgoščenosti na AC 22 bin	47
Graf 5: Primerjava vsebnosti votlin na AC 22 bin	47
Graf 6: Primerjava zgoščenosti na SMA 11	49
Graf 7: Primerjava vsebnosti votlin na SMA 11	49
Graf 8: Umeritvena premica za AC 32 base na nehomogeni asfaltni površini	54

1 UVOD

1.1 *Opredelitev obravnavane zadeve*

Trenutno uveljavljena neporušna metoda za merjenje zgoščenosti asfaltne plasti v voziščni konstrukciji je izvajanje meritev z izotopsko sondo. Metoda je relativna in točnost meritev je odvisna od umeritvenih krivulj za različne vrste asfaltnih zmesi, ki se pripravijo na podlagi laboratorijsko obdelanih asfaltnih jeder iz asfaltnih plasti.

Problemi uporabe izotopske sonde izhajajo predvsem iz veljavne zakonodaje in njenih zahtev po ustreznem varovanju zdravja ljudi ter okolja. Tako so zahteve zelo stroge glede prevažanja in rokovanja z opremo, ki povzroča radioaktivno sevanje, pa tudi pri varovanju zdravja delavcev, ki dejansko rokujejo s sondami, saj so pod posebnim zdravstvenim nadzorom. Za uporabnika izotopskih sond je izvajanje meritev povezano z mnogimi dodatnimi stroški ter tveganjem za zdravje delavcev. Zato je uporabo izotopskih merilnikov smiselno nadomestiti (kjer je to mogoče) z nenevarno alternativno metodo.

Z diplomsko nalogo želimo preveriti primernost uporabe elektromagnetne sonde, s katero bi si lahko olajšali merjenje zgoščenosti asfaltnih plasti v voziščni konstrukciji na terenu.

1.2 *Namen, cilji in osnovne trditve*

Namen diplomske naloge je preskušanje in uvedba novih načinov merjenja zgoščenosti asfaltnih plasti na terenu z elektromagnetno sondo in s tem zmanjšanje (v prihodnosti pa morda popolno ukinitve) dela z zdravju škodljivo radioaktivno izotopsko sondo.

Predstavili bomo način izvajanja meritev, prednosti, pa tudi morebitne pomanjkljivosti in napake, ki se lahko pojavijo pri delu z elektromagnetno sondo.

Cilj naloge bomo dosegli, če se problema lotimo v naslednjih smereh:

- a) pregled različnih postopkov merjenja zgoščenosti (elektromagnetna sonda, teoretična in praktična primerjava z izotopsko sondo);

- b) meritve zgoščenosti z različnimi merilniki ter priprava umeritvenih krivulj za različne vrste asfaltnih zmesi;
- c) ugotavljanje vplivov na točnost meritev, ponovljivost meritev, validacija;
- d) primerjava rezultatov, zaključne ugotovitve in ocena primernosti posameznih metod.

1.3 Predpostavke in omejitve raziskave

Pri pisanju diplomskega dela bomo uporabljali domačo in tujo strokovno literaturo, v veliko pomoč pa nam bo teoretično in praktično znanje, ki smo ga pridobili v času zaposlitve v Cestnem podjetju Maribor in Zavodu za gradbeništvo Slovenije (v nadaljevanju ZAG) ter pri študiju v mednarodnem izobraževalnem centru Academia.

Preskusi na terenu in v laboratoriju bodo izvedeni za več različnih asfaltnih plasti in v različnih vremenskih pogojih (temperatura, vlaga).

Zaradi specifičnosti metode umerjanja sonde je v diplomski nalogi nemogoče obdelati vse vplive na meritve in na vse vrste asfaltnih zmesi, ki se uporabljajo v Sloveniji, saj bi bila diplomska naloga preobsežna. Uporabnost elektromagnetne sonde na drugih zmesih in pri dodatnih pogojih se bo tako preverjala sproti – v prihodnjih mesecih in letih na gradbiščih po Sloveniji.

Za to diplomsko nalogo je zato izbranih nekaj najpogostejše uporabljenih asfaltnih zmesi, ki jih bomo analizirali z različnimi metodami merjenja zgoščenosti na terenu in v laboratoriju.

1.4 Predvidene metode raziskovanja

Za teoretični del diplomskega dela bomo uporabili:

- obstoječo strokovno domačo in tujo literaturo;
- literaturo, pridobljeno z interneta.

Raziskovalni del diplomske naloge bo predstavljen v naslednjih korakih:

- izvedba meritev z izotopsko sondo na terenu;
- izvedba meritev z elektromagnetno sondo na terenu;

- vrtanje asfaltnih plasti na terenu;
- preiskave asfaltnih vrtin v laboratoriju;
- obdelava dobljenih podatkov preiskav in meritev;
- analiza rezultatov;
- predstavitev ter razlaga rezultatov v razpredelnica in grafih;
- končne ugotovitve.

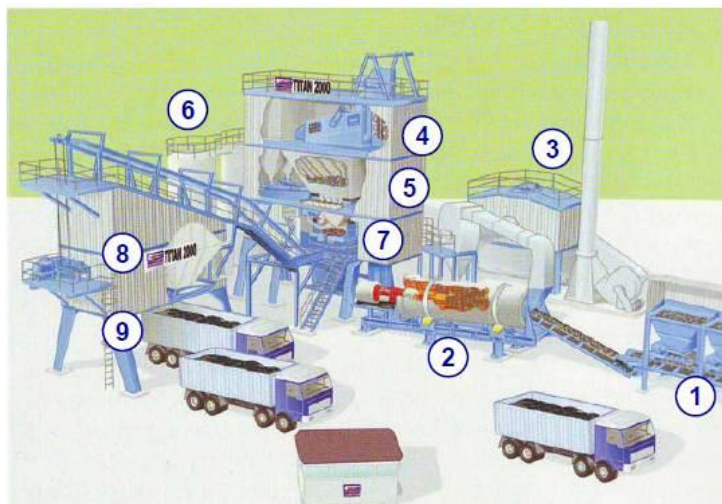
2 BITUMINIZIRANA ZMES

2.1 *Kaj je asfalt*

Asfalt je natančno načrtovana zmes kamnitih zrn, kamene moke (polnila), bitumna ter zraka (proste votline v zmesi). Začetki prvega asfalta segajo v leto 1870. Takrat je belgijski profesor Edward de Smedt izumil sodobno asfaltno cesto in prvi odsek iz te nove zmesi je bil vgrajen na William Street v Newarku, v New Jersey-u. Po začetnih ugotovitvah glede kakovostne in enostavne hitre vgradnje je ta patent hitro napredoval. Tako danes v razvitem svetu skorajda ni ceste, ki ne bi bila asfaltirana (http://teraidea.com/index.php/gradbeni_elementi/uporabni_materiali/kategorija/asfalt/, z dne 10.5.2011).

Osnovna sestavina asfaltne plasti, ki služi kot nosilni skelet, je zmes kamnitih zrn. Bitumen je osnova za vezivo, zraven njega pa je potrebno v zmes dodati še kameno moko, ki je nujna kot polnilo. Tako dobimo bitumensko malto. Dodajajo se lahko različni dodatki za različne namene uporabe bituminizirane zmesi, lahko se dodajajo tudi določeni sekundarni materiali, kot sta npr. steklo ali gumeni granulati iz predelanih odpadnih avtomobilskih gum. Lahko se dodaja barvni pigment, ki lahko zamenja kameno moko in nam ob uporabi sintetičnega bitumna obarva bituminizirano zmes v zeleni barvi.

V večini primerov poznamo bituminizirano zmes, ki je proizvedena po vročem postopku. Uporaba tovrstne zmesi je najbolj razširjena. Poznamo tudi hladne zmesi, ki so zelo pripravne za sanacije udarnih jam in manjša popravila. V zadnjem času se uporablja tudi reciklirana bituminizirana zmes. Gre za drobljeni asfaltni granulati, ki ga dodajamo v proizvodnjo nove vroče bituminizirane zmesi in nato uporabljamo za vezane nosilne plasti ter enoplastne sisteme za ceste z lahko prometno obremenitvijo. Poznamo še lite asfalte in trdo lite asfalte, ki so namenjeni za uporabo v garažah, industrijskih objektih. Proizvodnja bituminizirane zmesi po vročem postopku se vrši v tovarnah asfalta (glej Sliko 1).



Slika 1: Tipični primer tovarne asfalta

Vir: <http://www.fg.uni-mb.si/lucija/Gradiva-A/3-06%20Asfalt.pdf>, z dne 8. 3. 2011

Legenda:

- 1: Silosi hladnih kamnitih frakcij
- 2: Boben za sušenje in segrevanje kamnitih frakcij
- 3: Odpraševalna naprava s filtri in izpustom
- 4: Sistem sit
- 5: Silosi za vroče kamnite frakcije
- 6: Cisterne za bitumensko vezivo
- 7: Sistem tehtnic za doziranje vhodnih materialov
- 8: Mešalec za asfaltno zmes
- 9: Izmet zmesi na transportna sredstva

2.1.1 Zmes kamnitih zrn

Frakcije kamnitih zrn, ki se uporabljajo pri proizvodnji vroče bituminizirane zmesi, se v glavnem pridobivajo in obdelujejo v kamnolomih. Za bituminizirane zmesi za asfaltne plasti se lahko uporabljajo zmesi drobljenih in naravnih (zaobljenih) zrn iz:

- naravnih silikatnih in karbonatnih kamnin;
- umetnih kamnin – proizvedenih materialov (žlindre);
- recikliranega materiala (asfaltni granulat).

Za določen namen uporabe so lahko zmesi kamnitih zrn sestavljene iz ene ali več frakcij kamnitih zrn in kamene moke. Lastnosti zmesi kamnitih zrn so v harmoniziranih evropskih standardih SIST EN razvrščene v tri kategorije, in sicer po:

- geometrijskih lastnostih,
- fizikalnih lastnostih,
- kemijskih lastnostih.

Za vsako od navedenih lastnosti pa obstajajo še podrobnejše kategorije.

Minimalne zahteve za značilne lastnosti zmesi kamnitih zrn najdemo v standardu SIST EN13043.

2.1.2 Bitumen

Bitumen je vezivni material temno rjave do črne barve. Pojavlja se lahko v naravnem stanju (glej Sliko 2) ali pa se ga pridobiva z destiliranjem nafte. Če gledamo bitumen skozi zgodovino, lahko trdimo, da je to eden najstarejših poznanih gradbenih materialov. Z izvrstno oprijemljivostjo in nepropustnostjo je to čvrsto in trajno vezivo odporno na delovanje večine kislin, alkalij in soli. Največkrat se ga uporablja v proizvodnji vročih asfaltnih zmesi, ki se uporabljajo za gradnjo elastičnih cestnih konstrukcij. S segrevanjem ga utekočinimo in dobimo viskozno tekočino, ki je lepljiva. Ta viskozna tekočina se oprime površine kamnitih zrn, jih zajame ter ustvari popolno zmes, ki je potem v vgrajenem in ohlajenem stanju sposobna zdržati tudi največje obtežitve na konstrukcijah avtocest, letališč in dirkalnih stez. Minimalne zahteve za lastnosti bitumna so opisane v seriji produktnih standardov SIST EN in nacionalnih dodatkih (<http://www.gradbenik.eu/index.php?sl/Gradnja/Asfalt-v-gradnji-cest>, z dne 2.5.2011).



Slika 2: Naravni strjen bitumen

Vir: <http://en.wikipedia.org/wiki/Bitumen>, z dne 25.5.2011

2.1.3 Dodatki v vezivu

Z izbranimi dodatki bitumenskemu vezivu posledično spreminjamo lastnosti bituminizirane zmesi glede na namen uporabe končne plasti.

Najpogosteje se dodajajo dodatki, ki:

- izboljšajo oprijemljivost med vezivom in kamnitimi zrnji;
- povečajo odpornost bitumenskega veziva proti oksidaciji in staranju;
- omogočajo znižanje temperature pri proizvodnji bituminizirane zmesi;
- omogočajo povečanje debeline filma bitumenskega veziva na kamnitih zrnih in s tem podaljšanje trajnosti asfaltnih obrabnih plasti;
- zmanjšajo hrup na asfaltnih obrabnih plasteh.

2.1.4 Ostali dodatki

Uporabljajo se tudi dodatki, ki nimajo vedno funkcionalnega vpliva na proizvedeno asfaltno zmes, ampak so alternativa naravnim virom in imajo s tem okoljski učinek ali jih za določene namene uporabe dodajamo ob vgradnji vroče bituminizirane zmesi. Lahko gre za:

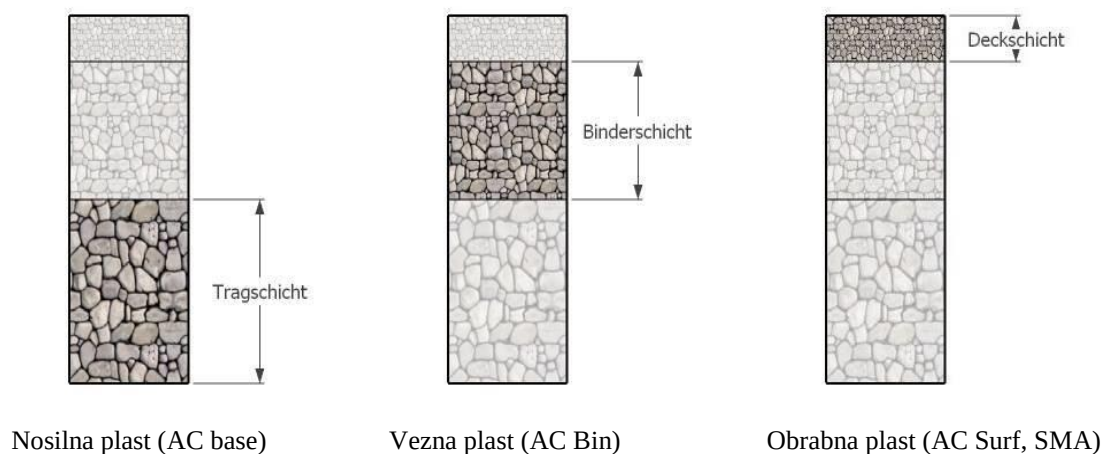
- dodatke istega tipa, kot so dodatki za k vezivu;
- razne odpadne materiale (guma, steklo, elektrofilitrski pepel ...);
- armature za ojačanje voziščne konstrukcije (jeklena, PP, PE, steklena vlakna).

2.1.5 Vrste bituminiziranih zmesi

Glede na presežno krivuljo ločimo štiri osnovne tipe asfaltnih zmesi:

- **Bitumenski beton (Asphalt Concrete; AC)**
 - Asfaltna nosilna plast (asphalt concrete base; AC BASE): je plast voziščne konstrukcije iz bituminizirane zmesi, vgrajena kot vezana zgornja nosilna plast (v enem ali več slojih) ali kot vezana spodnja nosilna plast (bitumenska stabilizacija zmesi kamnitih zrn).
 - Asfaltna vezna plast (asphalt concrete bin; AC BIN): je z bitumenskim vezivom vezana zmes kamnitih zrn, vgrajena pod obrabno plastjo (v krovno plast).

- Asfaltna obrabna plast (asphalt concrete surf; AC SURF): je z bitumenskim vezivom vezana zmes kamnitih zrn določenih velikosti, namenjena za izdelavo obrabnih in zapornih plasti.
- **Drobir z bitumenskim mastiksom (Stone mastic asphalt – SMA)**: je obrabno-zaporna, izravnalna ali zaščitna plast iz bituminizirane zmesi; velik delež drobirja zagotavlja skelet zrn, ki se notranje podpirajo, votline med njimi pa so v veliki meri zapolnjene z bitumenskim mastiksom.
- **Drenažni asfalt (Porous asphalt – PA)**: je obrabna plast iz bituminizirane zmesi z veliko vsebnostjo votlin, v kateri so makrovotline med seboj povezane; namenjena je za odvajanje vode, za preprečitev akvaplaninga in za zmanjševanje hrupa kotalečih koles (pnevmatik) vozil.
- **Liti asfalt (Mastic asphalt – MA)**: je bituminizirana zmes; v vročem stanju je gosto tekoča in je pri vgrajevanju ni treba zgoščati.



Slika 3: Različne vrste bituminiziranih zmesi

Vir: <http://wapedia.mobi/de/Asphalt>, z dne 25.5.2011

2.2 Vgradnja bituminizirane zmesi

2.2.1 Splošno

Bituminizirane zmesi se proizvajajo v asfaltnem obratu po projektirani ciljni sestavi iz zmesi kamnitih zrn, bitumenskega veziva, polnila in dodatkov. Pri vročem postopku proizvodnje moramo asfaltno zmes v vročem stanju tudi vgraditi. To pomeni, da mora od priprave bituminizirane zmesi pa do vgradnje preteči čim manj časa. Poleg temperature je eden od razlogov za čimprejšnjo vgradnjo tudi oksidacija bitumna, ki povzroča otrdevanje veziva in posledično težjo vgradnjo in s tem slabšo kakovost vgrajene bituminizirane plasti.

Asfaltno zmes, ki se proizvaja v asfaltnem obratu, se neposredno iz mešalnika ali skladiščnih silosov za vročo zmes natovarja na transportna sredstva. Ponavadi so to ustrezno opremljeni kamioni prekucniki. Pri tem mora biti keson kamiona nepoškodovan in čist ter premazan z ločilnim sredstvom, ki preprečuje, da bi se vroča bituminizirana zmes sprijela s kovino. Bituminizirana zmes mora biti na kamionu čim bolj enakomerno porazdeljena in ne glede na letni čas, oddaljenost od gradbišča ali vrsto bituminizirane zmesi obvezno tudi pokrita od začetka transporta pa vse do vgradnje. S prekrivanjem bituminizirane zmesi med transportom preprečimo prehitro ohlajevanje, zaščitimo jo pred atmosferskimi vplivi, pred umazanijo, s pokrivanjem pa tudi zmanjšamo vpliv bituminizirane zmesi na okolje (emisija toplote in vonja). V tehničnih predpisih (TSC 06.300/06.410:2009) je določeno, da se morajo pri transportu nad 70 km obvezno uporabljati termokesoni.

Za uspešno in kakovostno vgradnjo bituminizirane zmesi je zelo pomembna temperatura ob sami vgradnji. Zato je merjenje temperature pomemben in nujen ukrep pri prevzemu bituminizirane zmesi na gradbišču.

Pri vgradnji bituminizirane zmesi je potrebno, da se vgradi čim bolj enakomerno, da se ob vgradnji tudi primerno zgosti in da se promet po novi asfaltni plasti prepusti po ohlajeni plasti (sicer obstaja možnost pojava kolesnic).

Pred pričetkom vgradnje bituminizirane zmesi je potrebno dobro pripraviti podlago. Kadar gre za asfaltno podlago, se v ta namen uporabljajo razni rezkalniki, krtače in cisterne z vodo

za čiščenje ter cisterne za pobrizg z bitumensko emulzijo (Slika 4). Kadar gre za podlago iz kamnitih materialov (t.i. tampon), pa moramo poskrbeti, da je tamponska podlaga čim bolj ravna in je bila prevzeta s strani geomehanika ter geometra.



Slika 4: Pripravljena, pobrizgana podlaga pred asfaltiranjem

Vir: Lasten

Razgrinjanje bituminizirane zmesi poteka s pomočjo razdelilnika – finiŕerja (Slika 5). Pri tem mora biti finiŕer primerno pripravljen za vgrajevanje. Njegova vgrajevalna deska mora biti nastavljena na točno določeno ŕirino in debelino vgrajevanja. Delovanje finiŕerja temelji na principu »plavajoče gredi«, njegova naloga pa je, da enakomerno razprostre bituminizirano zmes na podlago. Sodobni finiŕerji so opremljeni z nabijalnimi gredmi, vibracijskimi ploŕčami in potisnimi letvami, tako da se ŕe ob samem vgrajevanju asfaltne plast nekoliko zgosti in ustvari ravno povrŕino. S tem se omogoči laŕŕjo zgostitev plasti, ki se nato vrŕi z valjarji in drugimi komprimacijskimi sredstvi. S finiŕerjem doseŕemo od 80–90 % zgoŕŕenost plasti. Zahtevana končna zgoŕŕenost asfaltne plasti je odvisna od vrste bituminizirane zmesi in od prometne obremenitve ceste; znaŕa pa od 97 do 100 % glede na laboratorijsko zgoŕŕeno zmes. Predzgostitev s finiŕerjem naj bo čim večja, saj s tem do določene mere izravnamo morebitne neravnine podlage, poleg tega je ućinek predzgositve enakomeren po celotni ŕirini asfaltne plasti.



Slika 5: Razdelilnik (finišer)

Vir: <http://petabyte.me/tehnoput/index.php/mehanizacija>, z dne 2.5.2011

Pri vseh daljših prekinitvah pri vgradnji moramo izvesti delovni stik, kar pomeni problematično mesto za obstojnost in ravnost površine asfaltne plasti. Praviloma moramo zagotoviti vgradnjo asfaltne plasti na čim daljših odsekih hkrati in s čim manj prekinitvami.



Slika 6: Vgrajevanje bituminizirane zmesi

Vir: <http://www.asfalti-ptuj.si/galerija.htm>, z dne 2.5.2011

Poleg vsega navedenega moramo biti pri vgrajevanju bituminizirane zmesi pazljivi še na vremenske razmere. Vgrajevanje v hladnem vremenu je s predpisi omejeno na najnižjo

temperaturo zraka, odvisno pa je tudi od vrste uporabljene bituminizirane zmesi. Pomembno vlogo ima še veter, ki lahko zelo hitro ohladi nezgoščeno asfaltno plast.

Obrabne plasti se ne sme vgrajevati v dežju in na mokro podlago, saj vlaga odvzema toploto asfaltni zmesi in se le-ta hitro hladi. Poleg tega mokra površina povzroča slabo zlepljenost med podlago in novo vgrajeno asfaltno plastjo oziroma med posameznimi asfaltnimi plastmi.

3 ZGOŠČENOST BITUMINIZIRANE ZMESI

3.1 Splošno

Za kakovostno vgrajeno asfaltno plast je pomembno primerno zgoščanje zmesi. Zgoščanje bituminizirane zmesi se deloma izvede pri strojnem razgrinjanju bituminizirane zmesi, kot je opisano v točki 2.2. Priporočeno je, da se bituminizirana zmes čim bolj zgosti že z finišejem, saj je potem zgoščanje z ostalimi komprimacijskimi sredstvi hitrejše in lažje.

Zgoščanje s komprimacijskimi sredstvi (valjarji) je potrebno pričeti na nižjem robu vozišča, tako da daje prvi zgoščeni pas oporo asfaltni plasti pri nadaljevanju zgoščanja (asfaltna plast nam ne leze). Valjar se mora pri zgoščanju čim bolj približati finišeju. Pri tem je treba paziti, da je pogonsko kolo valjarja pri vožnji proti finišeju spredaj, v nasprotnem primeru se nam lahko zgodi, da pogonsko kolo začne narivati asfaltno plast pred seboj. Valjar se mora vedno vračati po že zgoščeni plasti nazaj (od finišeja). Tak cikel imenujemo en prehod valjarja. Posamezni prehodi valjarjev se morajo delno prekrivati.

Pri zgoščanju je potrebno paziti, da se valjar premika čim bolj enakomerno. Vsako sunkovito obračanje ali zaviranje povzroča neravnine. Prav tako je potrebno pred vsakim ustavljanjem valjarja izklopiti vibracijo, poleg tega pa valjarji nikakor ne smejo stati na še vroči, nezgoščeni plasti bituminizirane zmesi, saj lahko valji pustijo vtise v asfaltni plasti.



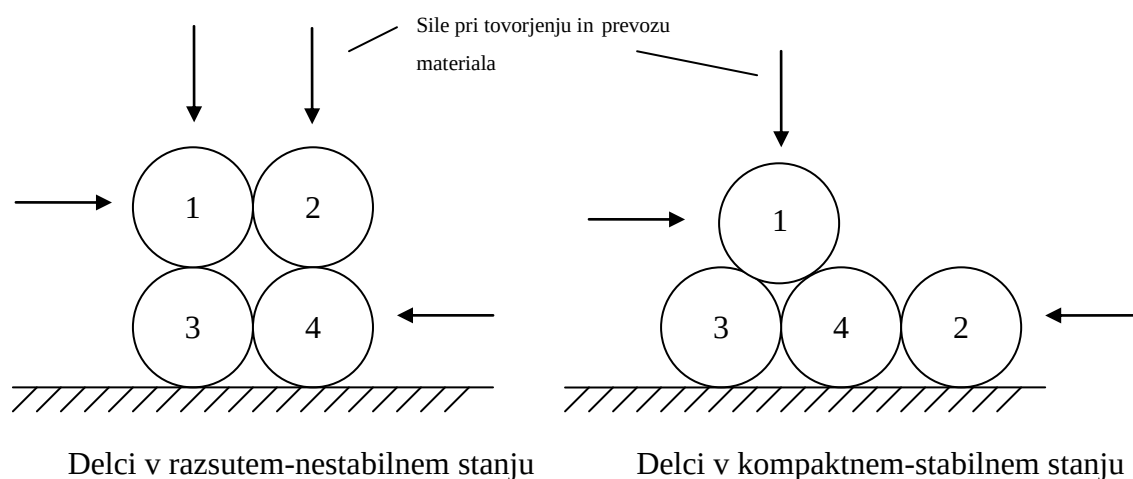
Slika 7: Valjanje asfaltni plasti za finišejem

Vir: Lasten

3.1.1 Princip zgoščanja bituminizirane zmesi

Bituminizirana zmes je ob vgrajevanju v »razsutem stanju«, to pomeni, da je v zmesi veliko zračnih votlin. To »razsuto« stanje je posledica predhodnih postopkov izdelave bituminizirane zmesi (izkop oz. drobljenje kamnitega materiala, mešanje bituminizirane zmesi, prevoz ...). V takšnem stanju ima bituminizirana zmes slabo nosilnost. Da bi zagotovili čim manj poškodb in deformacij na asfaltni cesti, moramo to nosilnost bituminizirane zmesi povečati. To storimo s »preureditvijo« delcev in z izločanjem zračnih votlin iz bituminizirane zmesi. Ta postopek imenujemo zbijanje ali zgoščanje.

Pri zbijanju se delci »preuredijo« tako, da samo okostje iz kamenega agregata zaseda manj prostora kot pred zbijanjem; s tem se izrinejo zračne votline. Posledica tega je, da isto število kamnitih delcev zasede manj prostora, torej smo dosegli večjo gostoto materiala. Kadar z zgoščanjem nadaljujemo predolgo, se nam lahko zgodi, da se tekočina (v našem primeru je to bitumen) izloči iz osnovnega skeleta in ob tem izločijo tudi najfinejše delce iz zmesi. Za zmesi, ki so zelo bogate z vsebnostjo bitumna, se lahko bitumenski madeži na površini pojavijo prej, kot smo dosegli ustrezno zgostitev plasti (znojenje površine).



Slika 8: Stabilnost materiala v odnosu z zgoščenostjo

Vir: H. J. Grootenboer: Compaction of Asphalt Road Pavements, 2004, stran 34

Dejavniki, ki vplivajo na zgoščenost asfaltnih zmesi

Za uspešno zgoščanje asfaltnih plasti so pomembni naslednji dejavniki:

- Stiskanje delcev med seboj: s tem se poveča število stičnih točk in trenje med delci, kar povzroči večjo stabilnost in nosilnost materiala.
- Zmanjšanje zračnih votlin: material postane tako bolj nepropusten. V premalo zgoščenem materialu so zračne votline večje in med seboj povezane. To omogoča vdor vode v konstrukcijo. Kisik iz zraka oksidira bitumen, ki postane krhek in manj odporen proti razpokam. Voda, ki prodre v material, lahko povzroči, da se bitumen loči od kamnitih delcev.
- Zgoščanje asfaltne plasti med vgradnjo: če se bituminizirana zmes med vgradnjo ne zgosti dovolj, se bo zgoščala še potem, ko bo po njej potekal promet. V takih primerih se na cesti pojavijo kolesnice (neravnine, valovi).

Cilj zgoščanja bituminizirane zmesi je doseganje optimalne vsebnosti zračnih votlin v plasti, da se zagotovi gladka in ravna površina ter dobra nosilnost konstrukcije. Naloga komprimacijskih strojev v procesu vgrajevanja bituminizirane zmesi je torej zmanjšanje votlin in povečanje gostote bituminizirane zmesi. Zračne votline med seboj niso več povezane, negativni učinki zraka in vode se tako zmanjšajo.

3.2 Določanje stopnje zgoščenosti

Ko material zgoščamo, se delci med seboj vedno bolj stiskajo. Te bližine delcev ne moremo neposredno izmeriti. Parametri, ki se uporabljajo v inženirski praksi za določanje optimalne zbitosti, so: gostota, vsebnost votlin, votline v kamniti zmesi (poroznost) in stopnja zgoščenosti.

Izrazi:

Vsebnost votlin: prostornina zračnih votlin v bitumenskem preskušancu, izražena kot odstotek celotne prostornine tega preskušanca.

Vsebnost zračnih votlin bitumenskega preskušanca se izračuna z uporabo največje gostote zmesi in prostorske gostote preskušanca.

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100 \quad \% \text{ (v/v)}$$

kjer je:

V_m vsebnost zračnih votlin zmesi, v 0,1 odstotkih (v/v);

ρ_m največja gostota zmesi, v kilogramih na kubični meter (kg/m^3);

ρ_b prostorska gostota preskušanca, v kilogramih na kubični meter (kg/m^3).

Gostota: je masa materiala na volumen materiala z zračnimi votlinami. Izrazimo jo z enoto kg/m^3 .

Gostoto bituminizirane zmesi lahko določimo v laboratoriju (asfaltne vrtine) in na terenu (izotopska sonda, elektromagnetna sonda).

Poznamo več postopkov za določanje gostote materiala. Za bituminizirane zmesi so ti postopki opisani v standardu SIST EN 12697 – 6:2004+A1:2007.

Poznamo tudi izraz optimalna gostota bituminizirane zmesi. To gostoto določimo z Marshallovim preizkušancem (SIST EN 12697 – 30), pomeni pa optimalno gostoto (100 % gostota), ki jo lahko dosežemo z zgoščanjem bituminizirane zmesi v laboratoriju, pri tem pa ohranimo primeren delež votlin v zbiti asfaltni zmesi.

Navidezna oz. največja (maksimalna) gostota: je masa materiala na volumen materiala brez zračnih votlin. Izrazimo jo z enoto kg/m^3 . Podatek o največji gostoti bituminizirane zmesi potrebujemo za izračun deleža (procenta) votlin v asfaltni zmesi.

Postopek določanja največje gostote je opisan v standardu SIST EN 12697 – 5.

Stopnja zgoščenosti: je razmerje med gostoto merjenega vzorca materiala in optimalno gostoto tega materiala (gostota izmerjena na Marshall preskušancu), ki jo izmerimo oz. določimo v laboratoriju.

Stopnjo zgoščenosti izrazimo v (%).

3.2.1 Določanje gostote bituminizirane zmesi v laboratoriju

Gostota se določa na preskušancu, ki ga pripravimo (zgostimo) v laboratoriju in na asfaltnih jedrih, ki smo jih izvrtali na terenu.

Izračunano gostoto laboratorijsko pripravljenega vzorca smatramo kot optimalno zgoščenost (100 %), ki jo lahko dosežemo s terenskim zgoščanjem za obravnavano asfaltno zmes.

Gostoto izvrtanih asfaltnih jeder obravnavamo kot dejansko zgoščenost asfaltne plasti na terenu.

Priprava vzorca za določitev optimalne gostote: (SIST EN 12697 – 30; Priprava preskušancev z udarnim zgoščevalnikom)

Potrebna količina bituminizirane zmesi za pripravo vzorca pri Marshall preskusu je odvisna od vrste bituminizirane zmesi. Masa zmesi za pripravo enega preskušanca se giblje med 1050 g in 1400 g, da dobimo ustrezno višino preskušancev, ki je v standardu predpisana.

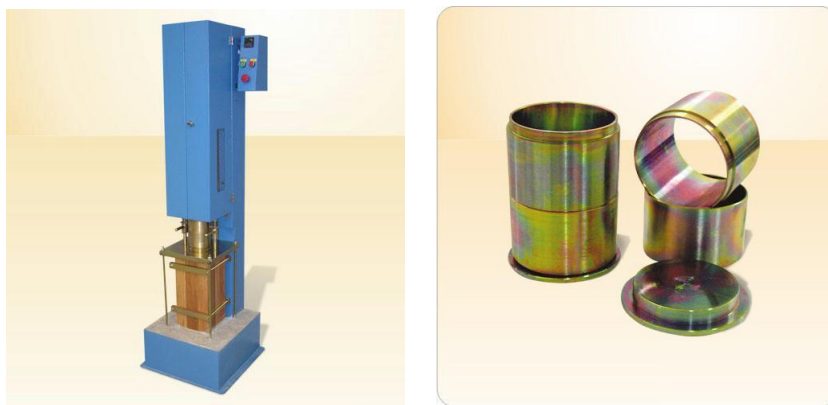
Vzorec bituminizirane zmesi segrejemo na delovno (nabijalno) temperaturo, ki je odvisna od tipa bitumna v zmesi. Pred pripravo prvega preskušanca je potrebno segreti tudi podstavek in kalup, v katerega se presuje zmes. Dno kalupa se pokrije z filtrskim papirjem, da se bituminizirana zmes ne »prilepi« na podstavek.

Vročo zmes nato vsujemo v nabijalni kalup z uporabo lijaka in s pomočjo lopatice. Pazimo, da ne pride do segregiranosti. Površino zmesi napolnjenega kalupa poravnamo z lopatico in pokrijemo z drugim filtrskim papirjem.

Kalup moramo napolniti in vzorec nabiti v 4 minutah. Nameščeno udarno kladivo nabija vzorec v 55 do 60 sekundah s 50 udarci. Po opravljenih 50 udarcih cilindrični kalup obrnemo in vzorec z udarnim kladivom s 50 udarci nabijemo še iz druge strani.

Odstranimo filtrski papir in označimo vzorce za prepoznavne namene.

Nabijalni kalup z vzorcem ohladimo na zraku in odstranimo iz kalupa.



Slika 9: Udarne zgoščevalnik in kalupi za izdelavo preskušanca

Vir: <http://www.exelscientific.org/en/>, z dne 8.5.2011

Določitev gostote (zgoščenosti) vzorca: (SIST EN 12697 – 6:2004+A1:2007 Ugotavljanje gostote bitumenskih preskušancev)

Gostoto bitumenskih preskušancev (pripravljenih po postopku v točki 3.4.4.1 ali pa na asfaltnih jedrih izvrtanih na terenu), lahko določimo po več postopkih (opisani so v standardu SIST EN 12697 – 6:2004+A1:2007), in sicer:

- specifična gostota – suha (bulk density dry);
- specifična gostota – nasičena in zaprta površina – SSD (bulk density – saturated surface dry SSD);
- specifična gostota – preskus z voskom (bulk density sealed specimen);
- specifična gostota z merjenjem (bulk density by dimensions).

Opisali bomo samo postopek SSD, ki smo ga uporabljali pri preiskavah zgoščenosti v tej diplomski nalogi.

Pri tem postopku moramo določiti maso suhega vzorca (vzorec stehtamo na gram natančno). Nato vzorec potopimo v vodo in ga pustimo, da se nasiči z vodo (po standardu je ta čas najmanj 30 minut). Po tem času vzorec s posebno tehniko stehtamo pod vodo. Izmerimo temperaturo vode in iz razpredelnice v standardu razberemo specifično gostoto vode pri določeni temperaturi. Vzorec vzamemo iz vode, ga obrišemo tako, da voda več ne kaplja iz njega, in ga ponovno stehtamo. Po matematični formuli izračunamo specifično gostoto materiala, ki jo izrazimo v kg/m^3 (v literaturi se včasih pojavi Mg/m^3).

Izračun:

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$$

kjer je:

ρ_{bssd} je specifična gostota (SSD) v kilogramih na kubični meter (kg/m³)

m_1 je teža suhega vzorca v gramih (g)

m_2 je teža vzorca v vodi v gramih (g)

m_3 je teža nasičenega, obrisanega vzorca v gramih (g)

ρ_w je gostota vode pri testni temperaturi v 0,1 kilograma na kubični meter

3.3 Izotopski merilnik za merjenje zgoščenosti

Vsi postopki za določanje specifične gostote in zgoščenosti materiala, ki smo jih do sedaj opisali, se izvajajo v laboratoriju. Ti postopki so zelo natančni, vendar ponavadi trajajo dalj časa. Pri vgrajevanju bituminizirane zmesi pa je zaradi prilagajanja sistema zgoščanja komprimacijskih strojev zelo pomembno, da se lahko sproti (torej že med samo vgradnjo) določi zgoščenost asfaltne plasti na posameznih mestih po dolžini poteka vgrajevanja. V ta namen se uporabljajo nedestruktivne metode merjenja zgoščenosti asfaltne plasti. Nedestruktivne metode so tiste, ki ne posegajo rušilno v samo cestno telo za določanje gostote asfaltne plasti (torej ne vrtamo ali kako drugače odvezemamo vzorcev).

Najpogostejša nedestruktivna metoda za določanje zgoščenosti asfaltne plasti, ki se uporablja v Sloveniji, je metoda merjenja z izotopsko oz. radioaktivno sondo. Izotopski merilci omogočajo hitro in enostavno določanje gostote na različnih gradbenih materialih. Izotopske sonde se danes uporabljajo predvsem pri zemeljskih delih, asfaltnih delih ter pri nekaterih posebnih meritvah materialov.

Metoda je v praksi uveljavljena že več kot trideset let. Pri nas se je uveljavila v začetku sedemdesetih let, predvsem v cestogradnji. Postopek merjenja in kalibracija izotopskih merilcev sta opisana v tehnični specifikaciji TSC 06.711:2001.

Princip delovanja izotopskih merilcev:

V osnovi je izotopski merilec gostote in vlage sestavljen iz vira radioaktivnega sevanja, detektorjev elektronskih sklopov in pomožnega pribora.

Gostota se določa z uporabo vira gama fotonov (npr. CS-137, Co-60, Ra-226). Del gama fotonov se pri presevanju skozi merjeno snov absorbira. Delež absorpcije je sorazmeren z gostoto. Z Geiger–Müller-jevim števcem se meri količina gama žarkov, ki se odbije od podlage. Rezultat posamezne meritve je število impulzov na določeno časovno enoto. Število impulzov (oziroma gama žarkov, ki se odbijejo od podlage) je v obratnem sorazmerju z gostoto plasti. Sorazmerje med gostoto plasti in številom impulzov je osnova za meritve gostote asfaltne plasti z izotopno sondo. Sorazmernostni faktorji med zgoščenostjo asfaltne plasti in številom impulzov so različni pri različnih asfaltnih zmesih oz. pri različnih debelinah asfaltnih plasti.

Vlago materiala se določa s pomočjo detekcije nevtronov. Del hitrih nevtronov, ki jih emitira vir (ponavadi je to zmes Am-241, Be), se upočasni ob interakciji z vodikovimi atomi in se registrira s posebnim, za to konstruiranim števcem.

Moderni izotopski merilci so opremljeni z mikroprocesorjem, ki hrani umeritvene konstante in je programiran za izračun mokre in suhe gostote, vlage in deleža zgoščenosti glede na referenčne vrednosti (pri zemeljskih delih) in izračun specifične gostote ter vsebnosti votlin v plasti glede na referenčne vrednosti pri asfaltnih delih (GIZ Gradis, interno gradivo).



Slika 10: Izotopska sonda Troxler

Vir: <http://www.kensains.com.my/troxler.html>, z dne 2.5.2011

3.3.1 Umeritvena (regresijska) premica

Ker pri meritvah z izotopskimi sondami ne dobimo neposredno rezultata zgoščenosti, ampak samo neko referenčno vrednost, moramo to vrednost spremeniti v dejanske rezultate zgoščenosti. To storimo s pomočjo regresijske premice, in sicer tako, da rezultate, ki smo jih dobili z sondnimi meritvami, primerjamo z rezultati zgoščenosti izvrtanih asfaltnih jeder.

Vhodni podatki za regresijsko premico so ($\{\text{Std/Imp}_1, \text{Std/Imp}_2, \dots, \text{Std/Imp}_{10}\}$ na osi x ter $\{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_{10}\}$ na osi y. Rezultat umeritve sta naklon regresijske premice A in odsek regresijske premice na ordinati B. Enačba premice je naslednja:

$$\text{Enačba 1 } (\rho_i) = A * (\text{Std/Imp}_i) + B.$$

Kriterij za dobro regresijsko premico je naslednji: za obrabne plasti mora biti vrednost korelacijskega (determinacijskega) koeficienta (R^2) nad 0,9, za nosilne plasti pa nad 0,8.

Korelacijski koeficient nam pove, kolikšen del variance spremenljivke A pojasnimo s spremenljivko B in ima lahko vrednost med 0 in 1.

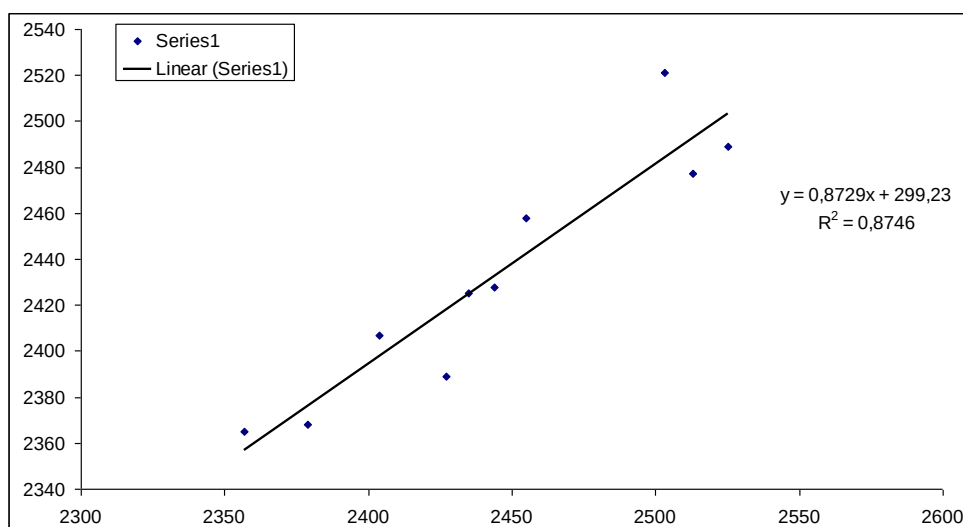
Predstavljen je primer izdelave regresijske premice, s katero lahko kasneje določimo zgoščenost asfaltne plasti na terenu. Primer je predstavljen za asfaltno zmes AC 8 surf B50/70. V razpredelnici vidimo, da smo opravili meritve z izotopsko sondo na desetih mestih. Na istih mestih smo izvrtali vrtine $\Phi 100$ mm, ki smo jim v laboratoriju določili gostote (kg/m³).

št.	meritve z sondo	gostota jeder (kg/m ³)
1	2379	2368
2	2427	2389
3	2357	2365
4	2444	2428
5	2455	2458
6	2503	2521
7	2404	2407
8	2513	2477
9	2525	2489
10	2435	2425

Razpredelnica 1: Terenski in laboratorijski rezultati za kalibracijo izotopske sonde

Vir: Lasten

Rezultate lahko prikažemo v grafu. Na X-osi so prikazani rezultati meritev z izotopskim merilnikom, na Y-osi pa rezultati specifične gostote jeder.



Graf 1: Primer umeritvene (kalibracijske) premice

Vir: Lasten

Dobili smo premico s pomočjo regresije: $y = 0,873x + 299,23$;

korelacijski koeficient (R^2) je 0,874, kar ustreza zahtevi (nosilne plasti $> 0,8$);

naklon regresijske premice (A) je 0,873;

odsek regresijske premice na ordinati y (B) je 299,23;

x = meritev z izotopno sondo;

enačba premice je : $A * (x) + B$

Če torej v premico vstavimo na primer meritev št. 4 iz tabele 3, dobimo izračun:

$$0,873 * 2444 + 299,23 = \underline{2433}$$

Gostota plasti, izmerjena z izotopno sondo na merjenem mestu št. tri, je torej 2433 kg/m³.

Če to primerjamo z asfaltnim jedrom, ki smo ga izvrtali na tem mestu in mu določili gostoto v laboratoriju (Marshall preskušane), vidimo, da sta končna rezultata dokaj podobna (sonda 2433 kg/ m³, jedro 2428 kg/ m³).

Torej lahko sklepamo, da je metoda določanja gostote materiala s pomočjo izotopske sonde dokaj natančna in zanesljiva.

4 NOVA METODA ZA MERJENJE ZGOŠČENOSTI PLASTI

Določanje gostote z izotopsko sondo je dokaj zanesljiva metoda, vendar ima svoje slabe lastnosti.

Najbolj očitna pomanjkljivost oz. slaba lastnost sonde je v samem načinu delovanja. Deluje na principu odboja radioaktivnega (ionizirajočega sevanja), kar je lahko zelo škodljivo za uporabnika izotopske sonde ter za ostale ljudi v bližnji okolici, kjer se izvajajo meritve. Zato morajo biti uporabniki izotopskih sond ustrezno usposobljeni za delo z ionizirajočim sevanjem. Redno se morajo udeleževati usposabljanj za delo z ionizirajočimi sevanji (trenutno je potrebno usposabljanje ponoviti na vsakih pet let), prav tako so delavci, ki rokujejo z izotopsko sondo podvrženi posebnemu zdravstvenemu nadzoru (zdravniški pregledi, spremljanje prejete doze sevanja s pomočjo osebnih dozimetrov).

Zakonodaja je zelo stroga glede transporta oz. prevoza radioaktivnih virov. Delavec, ki prevaža izotopsko sondo, mora opraviti poseben izpit za prevoz nevarnih snovi (ADR; certifikat o usposobljenosti voznikov motornih vozil za prevoz nevarnega blaga). Vozilo, v katerem se prevaža izotopska sonda, mora biti primerno opremljeno v ta namen (oznake na avtomobilu, primerna oprema v avtomobilu ...).

Že sam nakup izotopske sonde predstavlja velik, predvsem birokratski problem. Izotopske sonde mora nato redno pregledovati za to usposobljen inštitut. Izotopne sonde morajo biti skladiščene v za to primernih prostorih. Problem se lahko pojavi tudi pri delu v tujini, saj je potrebne veliko birokracije, dokazil in dovoljenj za prevoz radioaktivne sonde preko meja EU. In ne nazadnje, vse naprave, ki vsebujejo radioaktivne snovi, moramo po preteku življenjske dobe teh elementov pravilno skladiščiti. Za pravilno skladiščenje obstajajo v Sloveniji za to usposobljene organizacije (Centralno skladišče radioaktivnih odpadkov v Brinju; upravljavalec je Agencija za radioaktivne odpadke Slovenije).

Vsi zgoraj naštetih pogoji za delo z izotopsko sondo so povezani z večjimi finančnimi izdatki (usposabljanje zaposlenih, oprema avtomobilov, primerno skladišče za shranjevanje, letni pregledi naprav ...).

Zaradi tega se je pojavila težnja za določanje zgoščenosti na terenu z nedestruktivno metodo, vendar brez uporabe radioaktivnih snovi. Tako so v ZDA razvili sonde za določanje gostote s

pomočjo dielektrične konstante, ki jih uporabljajo že vrsto let, v Evropi pa se je pričela uporabljati v zadnjem času. Za uvajanje drugečnega principa izvajanja meritev je pomembno dokazati, da je ponovljivost in točnost meritev primerljiva z do sedaj uporabljeno izotopsko sondo.

4.1 Elektromagnetna sonda

4.1.1 Zgodovina

Zaradi že opisanih težav z uporabo izotopske sonde za merjenje zgoščenosti asfaltnih plasti se je pojavila težnja po drugačni, manj zdravju škodljivi metodi merjenja.

Tako je leta 1998 podjetje TransTech System predstavilo prvo neradioaktivno napravo za merjenje zgoščenosti, imenovano Pavement Quality Indicator ali PQI 100. Na raziskovalnem centru »Turner –Fairbank Highway Research Centre« so opravili prve študije s PQI 100 napravo. Študije so pokazale, da je z napravo veliko težav, kadar je pri meritvah prisotna vlaga, zato so bili rezultati zgoščenosti zelo nenatančni. Po nekaj novih prototipih sonde so leta 1999 predstavili elektromagnetno sondo PQI 300 (Slika 15). Ta model sonde je že uporabljal korekcijski faktor in algoritme za upoštevanje vlage v asfaltni plasti in na površini asfaltne plasti. V tem času je podjetje Troxler prav tako predstavilo elektromagnetno sondo, imenovano Pave Tracker.



Slika 11: Trans Tech PQI (1998)

Vir:

http://training.ce.washington.edu/WSDOT/Modules/07_construction/electrical_gauge.htm, z dne 2.5.2011

Tako so v ZDA leta 2000 in 2001 na več univerzah opravili testiranja z obema vrstama elektromagnetnih sond. Rezultati so pokazali, da elektromagnetne sonde sicer niso tako natančne kot izotopske sonde, vendar so dovolj natančne za določanje zgoščenosti na terenu. Edina težava je bila še vedno vlaga v asfaltni plasti in na površini asfalta, ki je lahko močno vplivala na rezultate meritev. Tako so predlagali proizvajalcem, da izboljšajo algoritme za upoštevanje vlage.

Tudi v Sloveniji so se pojavile razprave v strokovnih krogih o novem načinu merjenja zgoščenosti na terenu z elektromagnetno sondo. Tako je leta 2003 na Zavodu za gradbeništvo Slovenije potekala raziskovalna naloga o poskusnem merjenju zgoščenosti asfaltnih plasti z elektromagnetno sondo, katere vodja je bil doc. dr. Marjan Tušar. Uporabljena je bila sonda PQI proizvajalca TransTech. Ugotovitve so bile podobne kot pri raziskavah v ZDA, torej občutljivost na vlago in občutljivost na debelino asfaltne plasti (Vir: doc. dr. Marjan Tušar: Meritve gostote asfaltnih zmesi z elektronsko sondo Pavement Density Meter, ZAG,2003). Proizvajalci so v naslednjih letih še izboljševali delovanje elektromagnetnih sond, predvsem z izboljšanjem algoritmov za preračun in upoštevanje vlage. Tako smo leta 2009 na Zavodu za gradbeništvo Slovenije dobili sondo Pave Tracker Plus, model 2704-B proizvajalca Troxler iz ZDA, katere lastnosti in delovanje bomo predstavili v nadaljevanju.

4.2 Tip elektromagnetne sonde

V tej diplomski nalogi smo v večini preskusov uporabljali sondo tipa Troxler 2701-B. Ker se je kasneje v Sloveniji pojavila tudi elektromagnetna sonda drugega proizvajalca (Trans Tech), smo naredili nekaj preskusov primerljivosti meritev tudi s to sondo.

Osnovne značilnosti sonde Troxler 2701 B so (Vir: www.troxler.com):

Vrsta sonde: Model 2701B PaveTracker™ Plus

Velikost (šxdxv): 22.9 x 40.6 x 15.2 cm

Velikost transportnega kovčka(šxdxv): 34.3 x 45.1 x 25.4 cm

Teža: 5 kg

Teža s transportnim kovčkom: 14 kg

Temperatura shranjevanja: -20 so +70 °C

Delovna temperatura (okolica): 0 do +70 °C

Delovna temperatura (površina): max 170 °C

Enote: (lb/ft³) ali (kg/m³)

LCD zaslon: 4 vrstični osvetljen

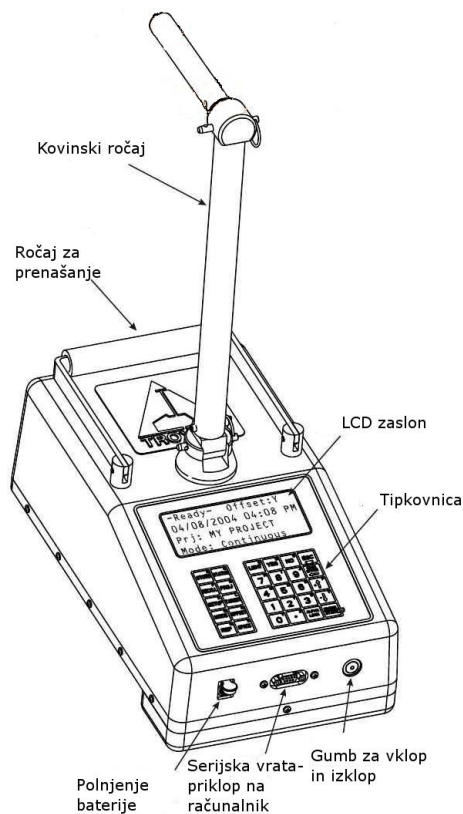
Shranjevanje podatkov: do 999 meritev

Globina merjenja: 2 do 4 cm

Akumulatorska baterija: deluje 32 ur pri polnem polnjenju

Kalibriranje na asfaltna jedra velikosti 150 mm

Vodoodporni transportni kovček z vgrajenim referenčnim standardom za začetno umeritev sonde.



Slika 12: Shema elektromagnetne sonde Troxler 2701-B

Vir: Navodila za sondo Troxler, 2009

4.3 Način delovanja

Elektromagnetna sonda deluje podobno kot izotopska sonda, torej nam kot rezultat meritve ne daje direktne gostote, ampak dobimo neko relativno vrednost, ki jo nato primerjamo z rezultatom zgoščenosti izvrtanega asfaltnega jedra. Izotopska sonda meri zgoščenost plasti s pomočjo odboja radioaktivnih valov, elektromagnetna sonda pa tako, da odkrije komponento zgoščenosti, ki je izražena kot dielektrična lastnost materiala. Pri zgoščanju bituminizirane zmesi se zračne votline v zmesi manjšajo, s tem se spreminja dielektrična lastnost zmesi, ki je osnova za detekcijo zgoščenosti z elektromagnetno sondo.

Tehnologija delovanja elektromagnetne sonde je povezana s kemijsko sestavo materialov v enoti volumna. Za relativno homogene bituminizirane zmesi se ob zgoščanju sprememba v dielektrični lastnosti premo sorazmerno večja. Dielektrična lastnost bituminizirane zmesi vključuje kemijske lastnosti kamnitih frakcij, veziva in zraka v zmesi. Zrak ima nižjo dielektrično konstanto kot ostale komponente zmesi, zmanjšanje zračnih votlin pri zgoščanju pa vplivajo na signal pri meritvi s sondo. Na enak način se ugotovi homogenost asfaltne plasti, saj pokaže segregirana mesta.

Dielektričnost materialov, ki sestavljajo asfaltno zmes:

Zrak = 1

Kamen + Bitumen = 5-6

Voda = 80

Elektromagnetna sonda, ki smo jo uporabljali pri tem preskusu, je opremljena s senzorjem za merjenje temperature podlage. Temperatura se pokaže v trenutku, ko sondo položimo na merjeno površino. Po navodilih za delo z elektromagnetno sondo je lahko najvišja temperatura podlage, na kateri izvajamo meritev, 170°C. Kadar je temperatura višja, nas sonda na to opozori z zvočnim signalom.

4.4 Priprava sonde in načini izvajanja meritev

Elektromagnetno sondo lahko začnemo uporabljati takoj po vklopu. Standardni blok za preverjanje delovanja sonde je vgrajen v kovčku za prenašanje, tako da je vedno pri roki. Merjenje standardnega bloka traja nekaj sekund.



Slika 13: Kovček za prenašanje elektromagnetne sonde

Vir: Lasten

Rokovanje z elektromagnetno sondo je predvsem zaradi njene teže in hitrosti meritev veliko lažje kot pri izotopski sondi. Rezultat meritve zgoščenosti in vsebnosti votlin se pokaže takoj in se obnavlja vsako sekundo.

Elektromagnetna sonda omogoča tri načine merjenja:

- neprekinjeno merjenje (continuous mode)

Pri tem načinu se rezultati meritev na LCD zaslonu izpisujejo sproti; pri vsakem premiku sonde se izvede meritev avtomatsko, v eni sekundi.

- metoda povprečne vrednosti (averaging mode)

Kadar merimo po načinu povprečja (averaging mode), nam sonda ob rezultatu trenutne meritve pokaže tudi povprečno zgoščenost vseh meritev na tej plasti.

Rezultati meritev se hranijo v interni spomin za možno kasnejšo obdelavo.

- metoda razpršenih rezultatov (segregation mode)

Ta način je podoben kot metoda povprečne vrednosti, vendar sonda sproti računa statistične podatke meritev (trenutna, povprečna, najvišja in najnižja izmerjena vrednost).

S tem lahko takoj opazimo preveliko razpršenost meritev.

Način umerjanja sonde za določeno asfaltno zmes je podobna kot pri umerjanju izotopske sonde (točka 3.3.1) in je opisana v ameriškem standardu ASTM D7113-09.

Za umeritev enega tipa asfaltne plasti potrebujemo meritve na najmanj sedmih (7) mestih, kjer izvrtamo vrtine. Meritve lahko izvedemo na asfaltni plasti pred vrtanjem, glede na obliko senzorja za merjenje z elektromagnetno sondo pa lahko umeritev izvajamo tudi direktno na vrtinah. Tako dobimo še bolj točen rezultat glede na vrtino, kot bi ga dobili pri merjenju na asfaltni plasti pred vrtanjem. V tem primeru mora biti premer vrtin $\Phi 150\text{mm}$.



Slika 14: Primer meritev zgoščenosti neposredno na vrtinah ($\Phi 150\text{mm}$)

Vir: Lasten

5 EKSPERIMENTALNI DEL

5.1 Program dela

Za določitev točnosti meritev z elektromagnetno sondo smo izvedli meritve zgoščenosti na različnih asfaltnih zmesih primerjalno z elektromagnetno sondo in izotopsko sondo. Na izmerjenih mestih smo izvrtali asfaltna jedra ter gostoto jeder določili v laboratoriju Zavoda za gradbeništvo v Ljubljani. Rezultate meritev (z elektromagnetno, izotopsko sondo ter rezultate jedra) na isti točki smo nato med sabo primerjali.

Večina meritev z elektromagnetno sondo v tej nalogi je bila opravljena s sondo tipa Troxler 2701 B. Med izvajanjem te diplomske naloge se je v Sloveniji pojavil novejši, programsko še bolj dodelan tip elektromagnetne sonde proizvajalca Trans Tech, s katerim smo izvedli nekaj primerjalnih meritev.

Oprema:

Pri preskusih, ki smo jih opravili in so predstavljeni v tej diplomski nalogi, smo uporabili naslednje tipe izotopskih in elektromagnetnih sond.

Izotopske sonde:

- Troxler 3340
- Troxler 4640-B

Elektromagnetne sonde:

- Troxler Pave Tracker Plus 2701-B (večina preskusov v tej diplomski nalogi).
- Trans Tech PQI 380

Izotopske sonde:



Slika 15: Troxler 4640-B

Vir: <http://www.kensains.com.my/troxler.html>, z dne 2.5.2011



Slika 16: Troxler 3440

Vir: Lasten

Elektromagnetne sonde:



Slika 17: Troxler Pave Tracker Plus 2701-B

Vir: <http://equipment.forconstructionpros.com/product/10146917/troxler-equipment/troxler-nuclear-surface-gauges>, z dne 2.5.2011



Slika 18: Trans Tech PQI 380

Vir: http://www.onestoptesting.co.uk/TransTech_Systems_Inc_PQI_380, z dne 5.5.2011

5.2 Obdelava rezultatov

5.2.1 Ponovljivost meritev

Z elektromagnetno sondo smo preskušali ponovljivost meritev na istem mestu. Meritve smo izvajali na asfaltni plasti AC 22 bin 45/80-50.

1. Meritve smo izvajali na isti točki, brez premikanja sonde

Statistični pokazalnik	
Število meritev	10
Povprečna vrednost	2344,7 kg/m ³
Ocenjeni standardni odmik	0,9
Največja vrednost	2347 kg/m ³
Najmanjša vrednost	2344 kg/m ³
Razpon	3 kg/m ³

Razpredelnica 2: Meritve z elektromagnetno sondo na isti točki

Vir: Lasten

2. Elektromagnetno sondo smo pred vsako meritvijo odstranili iz merilne točke, počakali eno minuto in nato na tej točki meritev ponovili.

Statistični pokazalnik	
Število meritev	10
Povprečna vrednost	2342,1 kg/m ³
Ocenjeni standardni odmik	5,2
Največja vrednost	2349 kg/m ³
Najmanjša vrednost	2335 kg/m ³
Razpon	14 kg/m ³

Razpredelnica 3: Meritve zgoščenosti na isti točki s premikanjem elektromagnetne sonde

Vir: Lasten

3. Elektromagnetno sondo smo pred vsako meritvijo na isti točki izklopili, ponovno vklopili in izvedli umeritev na standardni plošči.

Statistični pokazalnik	
Število meritev	10
Povprečna vrednost	2360 kg/m ³
Ocenjeni standardni odmik	3,7
Največja vrednost	2365 kg/m ³
Najmanjša vrednost	2352 kg/m ³
Razpon	13 kg/m ³

Razpredelnica 4: Meritve zgoščenosti na isti točki s izklopom in vklopom elektromagnetne sonde med vsako posamezno meritvijo

Vir: Lasten

Kot je razvidno iz razpredelnic, dajejo meritve z elektromagnetno sondo zelo ponovljive rezultate. Tudi kadar sondo izklopimo in ponovno vklopimo, jo premaknemo iz začetnega položaja in postavimo nazaj, je največja razlika med meritvami 30 kg/m³. Kadar sonde ne premikamo, so meritve na istem mestu praktično enake (največja razlika je 3 kg/m³).

5.2.2 Primerjava med različnimi metodami določanja zgoščenosti plasti

Da bi lahko določili natančnost in zanesljivost nove metode za merjenje zgoščenosti plasti z elektromagnetno sondo, smo jo preskusili na terenu. Rezultate meritev z elektromagnetno sondo smo nato primerjali z rezultati meritev izotopske sonde in pa rezultati zgoščenosti na jedrih, ki smo jih določili v laboratoriju (SIST EN 12697 – 6:2004+A1:2007).

Način dela:

Meritve smo izvajali na različnih vrstah asfaltnih plasti. Na asfaltni plasti smo izbrali najmanj deset točk. Na teh točkah smo najprej izvedli meritve z izotopsko sondo (TSC 06.711:2001), nato smo na istih mestih meritve ponovili še z elektromagnetno sondo (po ameriškem standardu ASTM D7113-09). Na vseh teh mestih smo nazadnje še izvrtali asfaltna jedra ($\Phi 150$ ali $\Phi 100$ mm) za določitev zgoščenosti asfaltne plasti v laboratoriju. Opravili smo

umeritev tako izotopske kot elektromagnetne sonde s pomočjo regresijske premice (kot je to opisano v točki 3.3.1), tako da smo lahko določili % zgoščenosti in % vsebnosti votlin v asfaltni plasti na izmerjenih točkah.

Vse rezultate (z elektromagnetno sondo, izotopsko sondo in asfaltna jedra) smo nato med seboj primerjali. Tako smo lahko preverili, ali obstajajo kakšna večja odstopanja rezultatov med posameznimi metodami določanja zgoščenosti asfaltne plasti.



Slike 19: Meritve na isti točki z izotopsko in elektromagnetno sondo ter izvrtano asfaltno jedro

Vir: Lasten

Bituminizirana zmes AC 16 surf B50/70 debelina plasti 6 cm

Elektromagnetna sonda tip: Troxler Pave Tracker Plus 2701-B

Izotopska sonda tip: Troxler 4640 B:

Asfaltna jedra: $\Phi 150$ mm

primerjava % zgoščenosti

	Elektro. sonda	Izotopska sonda	Vrtina
1	98,0	98,3	97,9
2	99,3	99,2	98,1
3	98,5	97,0	96,9
4	98,4	98,4	97,6
5	98,8	98,9	98,8
6	98,2	98,0	98,2
7	97,6	96,9	97,6
8	99,1	99,1	98,3
9	98,6	97,7	97,7
10	98,5	98,7	98,3
Povprečje	98,5	98,2	97,9
Standardni odmik	0,50	0,82	0,52
Največja vrednost	99,3	99,2	98,8
Najmanjša vrednost	97,6	96,9	96,9
Razpon	1,7	2,3	1,9

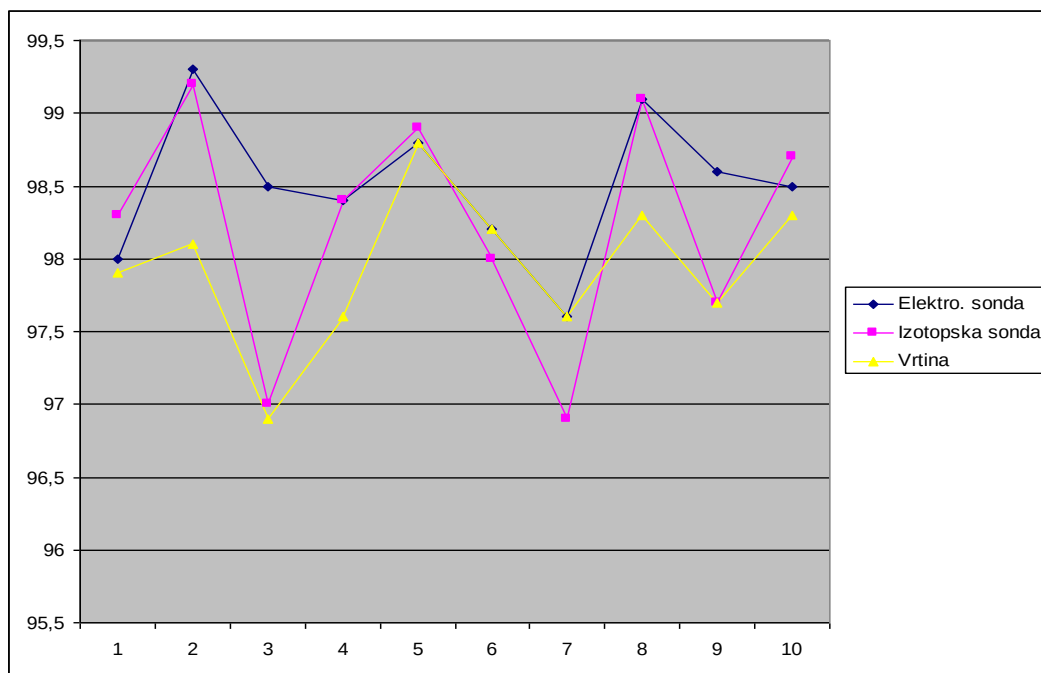
primerjava % vsebnosti votlin

	Elektro. sonda	Izotopska sonda	Vrtina
1	3,9	3,6	4,1
2	2,7	2,8	3,9
3	3,5	4,9	5,0
4	3,6	3,5	4,3
5	3,2	3,1	3,2
6	3,8	3,9	3,8
7	4,4	5,0	4,3
8	2,8	2,9	3,6
9	3,3	4,3	4,2
10	3,5	3,3	3,6
Povprečje	3,5	3,8	4,1
Standardni odmik	0,49	0,80	0,51
Največja vrednost	4,4	5,0	5,0
Najmanjša vrednost	2,7	2,8	3,2
Razpon	1,6	2,3	1,8

Razpredelnica 5: Primerjava rezultatov zgoščenosti in votlavosti med elektromagnetno in izotopsko sondo ter asfaltnimi jedri na AC 16 surf

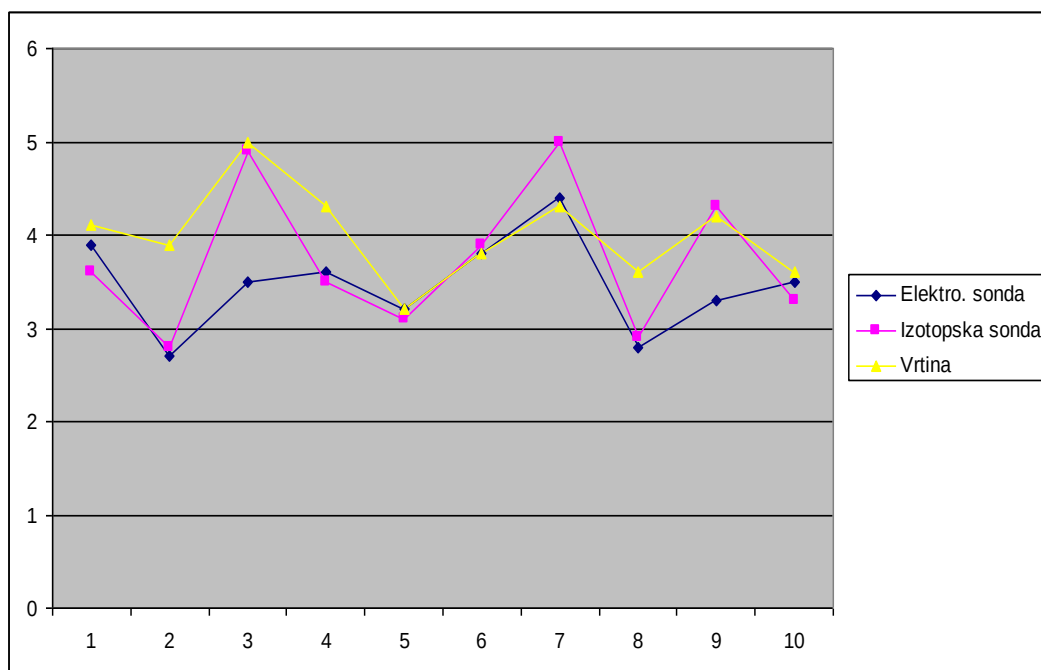
Vir: Lasten

Iz zgornjih razpredelnic lahko sklepamo, da so rezultati meritev med izotopsko in elektromagnetno sondo zelo primerljivi. Lahko se pojavi rahlo odstopanje (vrtina 3), kar pa je posledica same specifikacije delovanja obeh sond, pa tudi človeške napake.



Graf 2: Primerjava zgoščenosti na AC 16 surf

Vir: Lasten



Graf 3: Primerjava vsebnosti votlin na AC 16 surf

Vir: Lasten

Po navodilih proizvajalca je največja globina merjenja z elektromagnetno sondo do 4 cm. S tem je primerna za merjenje predvsem tanjših plasti asfalta, vendar smo jo preskusili tudi na debelejših (nosilnih in veznih) plasteh. Seveda pa moramo biti pri debelejših asfaltnih plasteh bolj previdni pri izvajanju meritev z elektromagnetno sondo, saj nam sonda ne izmeri celotne debeline plasti, ampak samo zgornji del (do globine 4 cm). Tako lahko prihaja do različnih rezultatov med sondnimi meritvami in med rezultati zgoščenosti na asfaltnih jedrih.

Bituminizirana zmes AC22bin PmB 45/80-50, debelina plasti 8 cm

Elektromagnetna sonda tip: Troxler Pave Tracker Plus 2701-B

Izotopska sonda tip: Troxler 3440

Asfaltna jedra: $\Phi 150$ mm

Primerjava % zgoščenosti

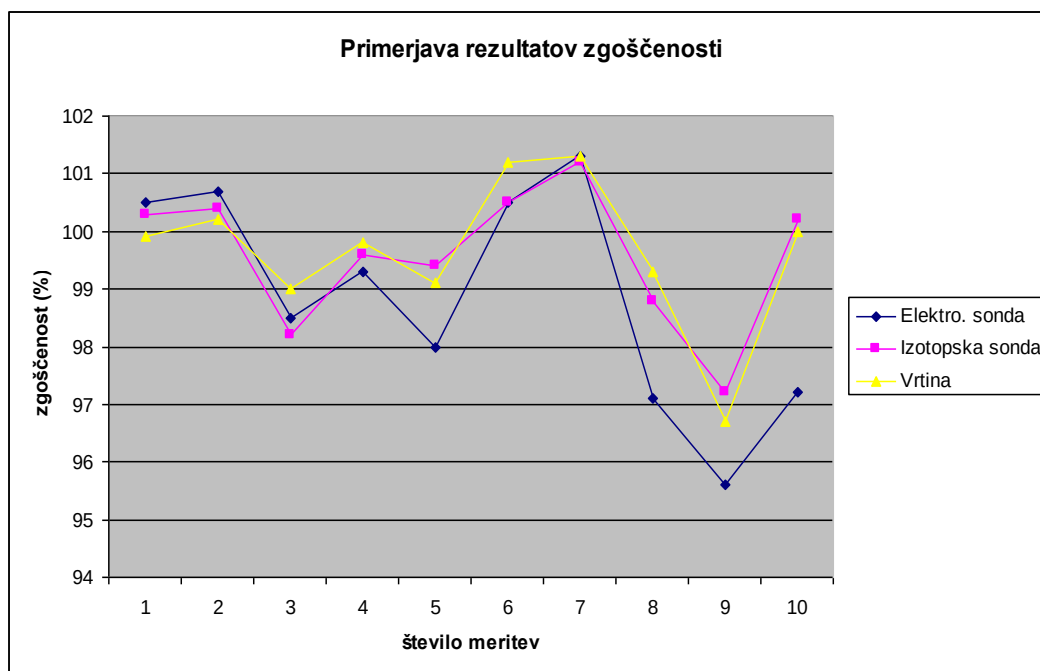
	Elektro. sonda	Izotopska sonda	Vrtina
1	100,5	100,3	99,9
2	100,7	100,4	100,2
3	98,5	98,2	99,0
4	99,3	99,6	99,8
5	98,0	99,4	99,1
6	100,5	100,5	101,2
7	101,3	101,2	101,3
8	97,1	98,8	99,3
9	95,6	97,2	96,7
10	97,2	100,2	100,0
Povprečje	98,9	99,6	99,6
Standardni odmik	1,9	1,2	1,3
Največja vrednost	101,3	101,2	101,3
Najmanjša vrednost	95,6	97,2	96,7
Razpon	5,7	3,9	4,6

Primerjava % vsebnosti votlin

	Elektro. sonda	Izotopska sonda	Vrtina
1	6,2	6,4	6,8
2	6,0	6,2	6,4
3	8,1	8,3	7,6
4	7,3	7,0	6,8
5	8,6	7,2	7,5
6	6,2	6,2	5,6
7	5,4	5,6	5,5
8	9,3	7,8	7,3
9	10,8	9,3	9,7
10	9,3	6,4	6,7
Povprečje	7,7	7,3	7,2
Standardni odmik	1,6	1,1	1,2
Največja vrednost	10,3	9,1	9,8
Najmanjša vrednost	6,3	6,1	5,6
Razpon	4,3	3	4,2

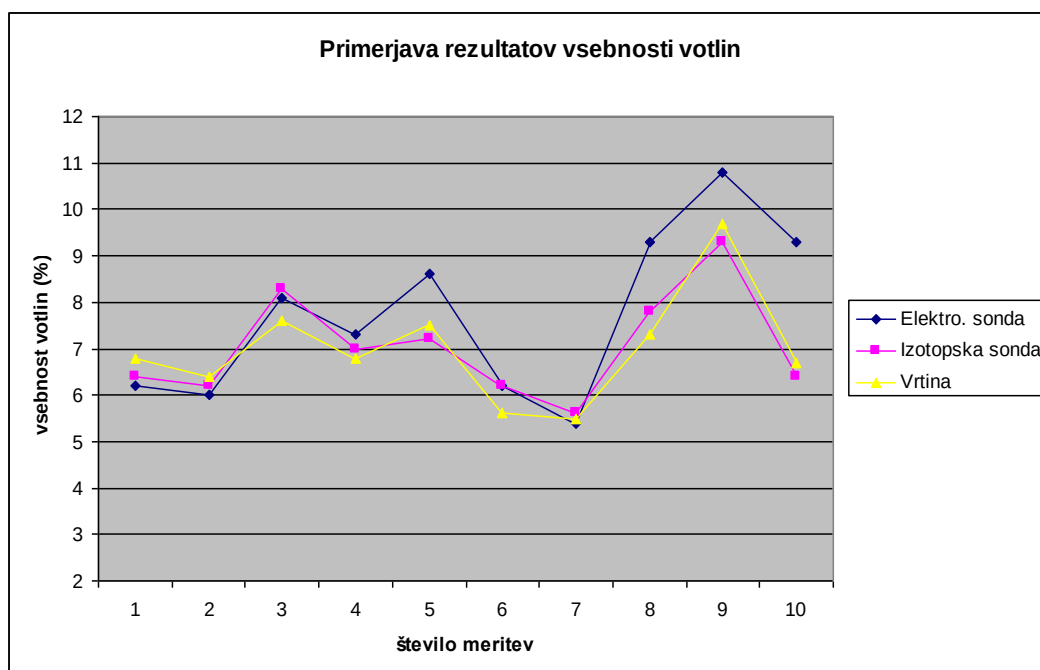
Razpredelnica 6: Primerjava rezultatov zgoščenosti in votlavosti med elektromagnetno in izotopsko sondo ter asfaltnimi jedri na AC 22 bin

Vir: Lasten



Graf 4: Primerjava zgoščenosti na AC 22 bin

Vir: Lasten



Graf 5: Primerjava vsebnosti votlin na AC 22 bin

Vir: Lasten

Iz zgornjih rezultatov meritev lahko vidimo, da se elektromagnetna sonda dobro obnese tudi na bolj grobozrnatih in debelejših asfaltnih plasteh. Razlika v meritvah med izotopsko in elektromagnetno sondo je minimalna.

Bituminizirana zmes SMA 11 PmB 45/80-65, debelina plasti 4 cm

Elektromagnetna sonda tip: Troxler Pave Tracker Plus 2701-B

Izotopska sonda tip: Troxler 4640

Asfaltna jedra: $\Phi 150$ mm

Primerjava % zgoščenosti

	Elektro. sonda	Izotopska sonda	Vrtina
1	97,9	97,5	98,0
2	100,0	99,3	99,0
3	96,9	96,3	96,0
4	99,6	100,0	100,0
5	97,9	98,6	97,3
6	98,7	99,0	99,2
7	99,9	99,9	100,2
8	99,3	99,2	98,7
Povprečje	98,8	98,7	98,5
Standardni odmik	1,11	1,27	1,42
Največja vrednost	100,0	100,0	100,2
Najmanjša vrednost	96,9	96,3	96,0
Razpon	3,0	3,7	4,2

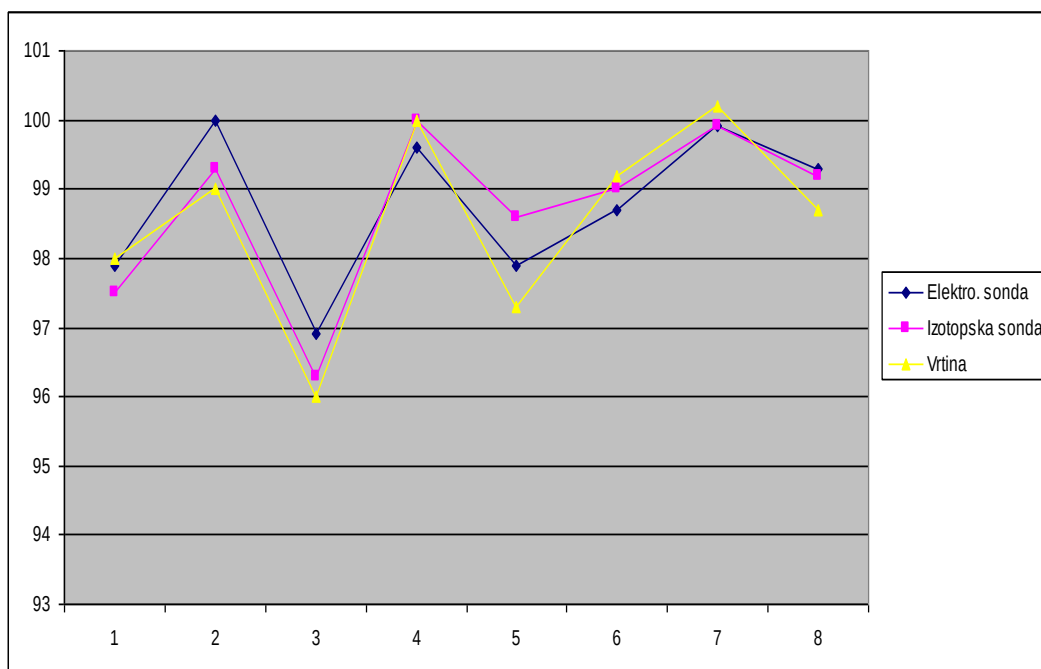
Primerjava % vsebnosti votlin

	Elektro. sonda	Izotopska sonda	Vrtina
1	6,2	6,6	6,1
2	4,2	4,9	5,2
3	7,1	7,7	8,0
4	4,6	4,2	4,2
5	6,2	5,5	6,8
6	5,5	5,1	5,0
7	4,3	4,2	4,0
8	4,9	4,9	5,5
Povprečje	5,4	5,4	5,6
Standardni odmik	1,06	1,22	1,36
Največja vrednost	7,1	7,7	8,0
Najmanjša vrednost	4,2	4,2	4,0
Razpon	2,9	3,6	4,0

Razpredelnica 7: Primerjava rezultatov zgoščenosti in votlavosti med elektromagnetno in izotopsko sondo ter asfaltnimi jedri na AC 22 bin

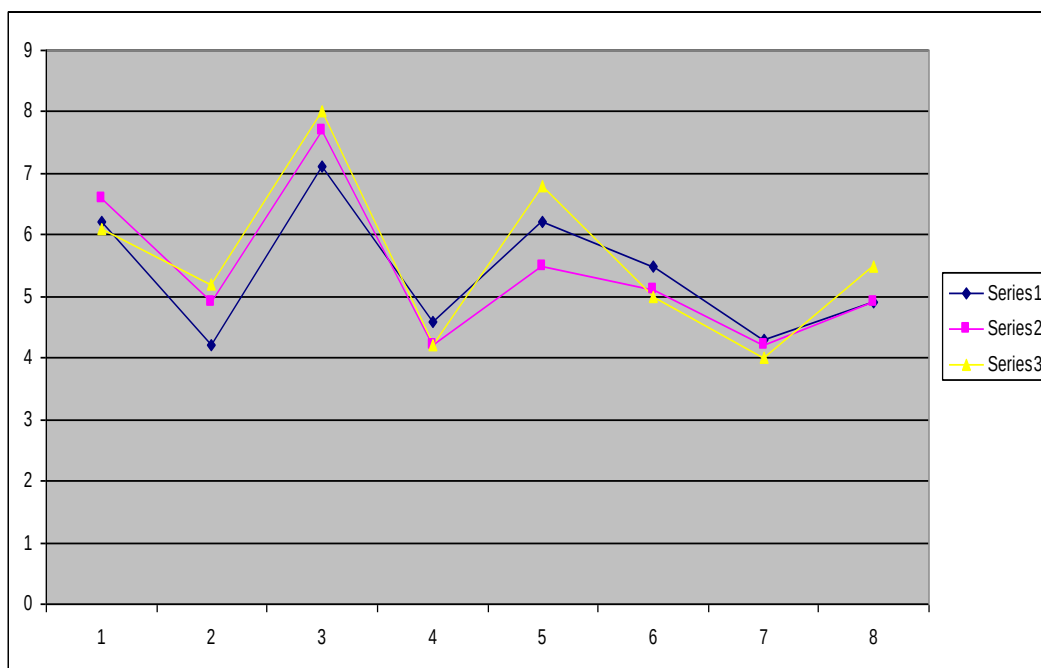
Vir: Lasten

Glede na manjšo debelino plasti (4 cm) smo po pričakovanju tudi na asfaltni zmesi SMA 11 dobili podobne rezultate med tremi različnimi metodami določanja zgoščenosti asfaltnih plasti.



Graf 6: Primerjava zgoščenosti na SMA 11

Vir: Lasten



Graf 7: Primerjava vsebnosti votlin na SMA 11

Vir: Lasten

5.2.3 Elektromagnetna sonda Trans Tech PQI 380

V času izvajanja diplomske naloge je eden od izvajalcev asfalterskih del v Sloveniji kupil elektromagnetno sondo proizvajalca Trans Tech. Sonda deluje na istem principu obnašanja dielektričnosti materialov, vendar pa je sam način izvajanja meritev nekoliko drugačen.

Sonda Trans Tech PQI 380 ima nekoliko bolj izpopolnjeno programsko opremo, ki po zagotovilih proizvajalca natančneje upošteva vlago asfaltne površine ter upošteva korekcijski faktor glede na največjo velikost zrna v asfaltni zmesi.

Opravili smo nekaj primerjav med sondami Trans Tech, elektromagnetno sondo Troxler, izotopsko sondo Troxler ter asfaltnimi vrtnami, ki so predstavljene v razpredelnici št. 7.

BITUMINIZIRANA ZMES AC 32 base B 50/70

ŠT.	TECH TRADE ELEKTRO. (kg/m ³)	TROXLER IZOTOPSKA (kg/m ³)	TROXLER ELEKTRO. (kg/m ³)	VRTINE (kg/m ³)
1	2455	2462	2458	2443
2	2474	2470	2487	/
3	2429	2428	2394	/
4	2437	2469	2455	/
5	2469	2454	2465	2479
6	2415	2424	2416	2419
povprečje	2447	2451	2446	2447
standardni odmik	23	20	34	30
največja vrednost	2474	2470	2487	2479
najmanjša vrednost	2415	2424	2394	2419
razpon	59	46	93	60

Razpredelnica 8: Primerjava specifične gostote med različnimi metodami na AC 32 base

Vir: Lasten

Iz razpredelnice 10 lahko razberemo, da so rezultati vseh štirih različnih postopkov merjenja zgoščenosti dali zelo podobne rezultate. Ob tem pa je potrebno opozoriti, da je bila umeritev

za vse tri vrste sond s pomočjo korelacijske premice narejena samo s tremi vrtnami, zato so rezultati in primerjave samo informativni in jih ne moremo jemati kot natančne in relevantne.

5.3 Vplivi na rezultate merjenja

5.3.1 Vlaga

Glede na princip delovanja sonde lahko sklepamo, da ima vlaga največji vpliv na meritve z elektromagnetno sondo. Pri tem mislimo predvsem na vlago merjene asfaltne površine. Predvsem je potrebno paziti, da sonde ne polagamo direktno na asfaltno površino, kjer je stoječa voda. Tudi kadar je asfaltna površina samo vlažna, moramo biti pri meritvah previdni. Najbolj natančne in relevantne rezultate dobimo, kadar merimo na povsem suhi asfaltni površini.

Poskusi na terenu so tudi pokazali, da ima vlaga v zraku zanemarljive učinke na rezultate meritev.

Primer meritev z elektromagnetno in izotopsko sondo na mokri površini.

Pri tem poskusu smo z elektromagnetno in izotopsko sondo najprej izvedli meritve na suhi površini, nato smo površino asfalta polili z vodo in meritve ponovili. Nato smo meritve ponovno izvedli, ko se je asfaltna površina nekoliko posušila, nazadnje pa smo površino še popivnali z brisačo ter meritve ponovili.

Rezultati:

Elektromagnetna sonda	
Suha površina	2321 kg/m ³
Zelo mokra površina (voda stoji na površini)	2654 kg/m³
Mokra površina	2405 kg/m ³
Popivnana asfaltna površina	2341 kg/m ³

Razpredelnica 9: Rezultati meritev z elektromagnetno sondo na mokri površini

Vir: Lasten

Izotopska sonda	
Suha površina	2434 kg/m ³
Zelo mokra površina (voda stoji na asfaltu)	2463 kg/m³
Mokra površina	2450 kg/m ³
Popivnana asfaltna površina	2441 kg/m ³

Razpredelnica 10: Rezultati meritev z izotopsko sondo na mokri površini

Vir: Lasten

Kot vidimo iz razpredelnice, voda oziroma vlaga na asfaltni površini zelo vpliva na meritve z elektromagnetno sondo. Sploh kadar merimo na zelo mokri asfaltni površini (kadar se na njej nahaja stoječa voda), so rezultati z elektromagnetno sondo povsem neuporabni. Ko smo asfaltno površino popivnali in obrisali, so bile meritve z elektromagnetno sondo že zelo primerljive z meritvami na suhi površini. Vendar pa, da bi lahko zagotovili čim bolj natančne in relevantne rezultate, je potrebno meritve z elektromagnetno sondo izvajati na povsem suhi površini.

Prav tako je potrebno paziti pri merjenju asfaltne plasti takoj po dežju. Čeprav je sama površina asfalta že suha, se lahko zgodi, da je v sami asfaltni plasti toliko vode, da dobimo rezultate, ki odstopajo od rezultatov, ki smo jih dobili pred dežjem.

5.3.2 Elektromagnetni dejavniki v okolju

Proizvajalec sonde Troxler v svojih navodilih opozarja na možnost napak pri meritvah zaradi motenj, ki jih povzročajo elektronske naprave v bližini mesta, kjer izvajamo meritve.

Najpogostejša naprava, ki oddaja elektromagnetno sevanje in nas spremlja povsod, je seveda mobilni telefon. Preskuse z mobilnim telefonom smo izvajali na različnih oddaljenostih od elektromagnetne sonde. Ugotovili smo, da bližina mobilnega telefona ne vpliva na rezultate meritev, razen če ni mobilni telefon oddaljen le nekaj centimetrov od elektromagnetne sonde oz. je direktno na njej.

Tudi drugi viri, ki oddajajo elektromagnetno sevanje, niso povzročili večjih odstopanj pri izvajanju meritev. Potrebno pa je posvetiti pozornost pri izvajanju meritev v neposredni bližini večjih elektromagnetnih sevanj, ki jih oddajajo visokonapetostni električni vodi ali pa oddajniki za mobilno telefonijo. Motnje zaradi elektromagnetnega sevanja lahko na

elektromagnetni sondi opazimo takoj, saj se številčni signal pri meritvi ne ustavi (kot je to običajno), ampak se nenehno spreminja.

5.3.3 Površina asfaltne plasti

Površina asfaltne plasti je zelo pomembna pri meritvah tako z izotopsko kot tudi z elektromagnetno sondo. Elektromagnetna sonda Troxler, s katero smo naredili večino preskusov, lahko meri gostoto do 4 cm v globino asfaltne plasti. To lahko predstavlja problem predvsem pri debelejših (nosilnih in veznih) asfaltnih plasteh. Drug problem je hrapavost oz. segregiranost površine. Kadar sondo postavimo na površinsko zelo segregirano mesto, nam bo pokazala zelo nizko zgoščenost, čeprav lahko kasneje z merjenjem zgoščenosti asfaltne vrtine ugotovimo, da je bila v povprečju dovolj dobro zgoščena. Obratno se lahko zgodi, kadar postavimo sondo na zelo zaprto mesto ali pa naletimo na večji kamen v plasti. V tem primeru nam elektromagnetna sonda pokaže zelo visoke rezultate zgoščenosti, ki pa tudi niso realna slika stanja zgoščenosti plasti.

Zato je zelo pomembno, da sondo postavimo na primerno mesto (torej ne preveč segregirano in ne preveč zaprto), saj lahko samo tako dobimo primerljive rezultate zgoščenosti plasti.

Primer meritev na segregirani asfaltni plasti:

Meritve smo izvajali na nosilni asfaltni plasti AC 32 base B 50/70. Debelina plasti je bila 12 cm. Elektromagnetna sonda meri samo 4 cm v globino plasti, zato bi morala biti plast izredno homogena, da bi dobili natančne in relevantne rezultate.

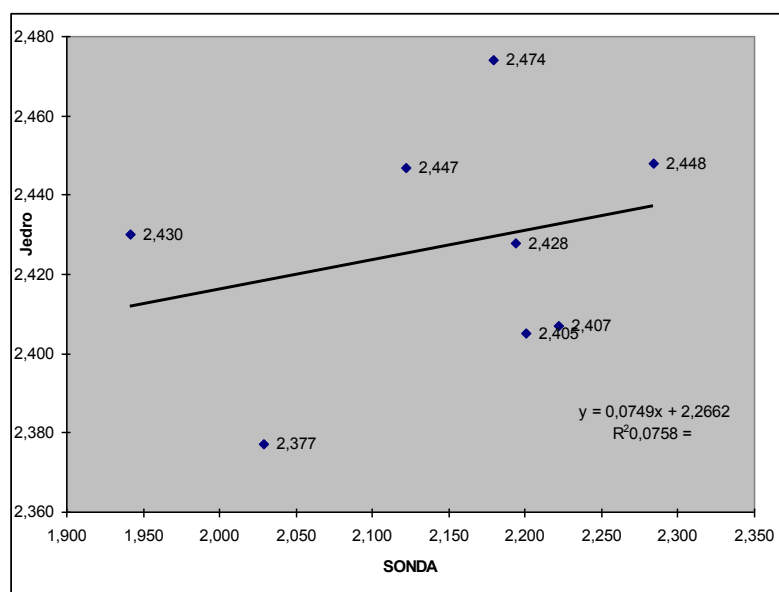
V našem primeru je bila problem segregirana površina asfaltne plasti, kar je dodatno oteževalo meritve z elektromagnetno sondo. Na vseh mestih, kjer so se opravile meritve z elektromagnetno sondo, smo izvrtali vrtine $\Phi 150$ in jim določili gostoto v laboratoriju.

V tem primeru nismo imeli možnosti izvajanja meritev še z izotopsko sondo.

Št. Meritve	1	2	3	4	5	6	7	8
Elektro. Sonda-impulzi	1,942	2,284	2,179	2,201	2,194	2,029	2,222	2,122
Vrtine	2,430	2,448	2,474	2,405	2,428	2,377	2,407	2,447

Razpredelnica 11: Rezultati vrtin in elektromagnetne sonde na nehomogeni asfaltni površini

Vir: Lasten



Graf 8: Umeritvena premica za AC 32 base na nehomogeni asfaltni površini

Vir: Lasten



Slika 20: Nehomogena površina asfaltne plasti

Vir: Lasten

V točki 3.3.1 smo ugotovili, da mora biti za dobro regresijsko premico izpolnjen pogoj, da je korelacijski koeficient (R^2) za nosilne plasti večji kot 0,8.

V našem primeru lahko vidimo, da je regresijska premica povsem neuporabna za umeritev elektromagnetne sonde; korelacijski koeficient je komaj 0,07. Tudi kadar izbrišemo najboljšo in najslabšo meritev (tako izločimo možnost človeške napake pri meritvah), dobimo korelacijski koeficient (R^2) cca. 0,3, kar še vedno ne izpolnjuje pogoja ($R^2 > 0,8$).

Zakaj je prišlo do takšnih razlik med rezultati dveh različnih metod določanja gostote?

Za primer si pogledjmo tri merilna mesta, kjer smo dobili podobne rezultate gostot vrtin (merilno mesto 1, 2 in 5). Glede na to, da so rezultati vrtin na teh mestih med seboj zelo podobni, bi morali sklepati, da bodo tudi sondni impulzi na teh treh mestih podobni. Kot lahko vidimo v razpredelnici št. 13, pa so rezultati z elektromagnetno sondo zelo razpršeni. Razlog je bil v zelo nehomogeni (na nekaterih mestih zelo zaprti, na nekaterih pa segregirani) površini asfaltne plasti.

št. merilnega mesta	Vrtine (kg/m³)	Sondni impulzi
merilno mesto 1	2430	1942
merilno mesto 2	2448	2284
merilno mesto 5	2428	2194
maksimalna vrednost	2448	2284
minimalna vrednost	2428	1942
razpon	20	342
standardni odmik	11,02	177,28

Razpredelnica 12: Primerjava rezultatov zgoščenosti vrtin in sondnih impulzov na nehomogeni površini

Vir: Lasten

V razpredelnici št. 11 vidimo razliko v razponu gostote na treh merilnih mestih med tremi asfaltnimi vrtinami (razpon je minimalen; 20 kg/m³) in pa med meritvami z elektromagnetno sondo (razpon je zelo velik med 1942 in 2284 impulzi).

Iz tega sklepamo, da je zelo pomembno, na kakšni površini asfaltne plasti izvajamo meritve z elektromagnetno, pa tudi z izotopsko sondo. Nepravilna postavitev sonde (na zelo segregirano ali zelo zaprto plast) nam lahko izmeri popolnoma napačne podatke o zgoščenosti.

6 ANALIZA REZULTATOV

Ponovljivost meritev: Rezultati meritev z elektromagnetno sondo so zelo dobro ponovljivi. Pri merjenju na isti točki se posamezni rezultati skoraj ne razlikujejo med seboj. V tem pogledu so meritve z elektromagnetno sondo celo nekoliko bolj ponovljive od meritev z izotopsko sondo.

Primerjava med različnimi metodami določanja zgoščenosti (validacija postopka): Stopnjo zgoščenosti smo določali z izotopsko sondo, elektromagnetno sondo in z asfaltnimi vrtnami na različnih tipih bituminizirane zmesi in na različnih debelinah plasti. Meritve smo izvajali na AC 32 base, AC 22 bin, AC 16 surf, SMA 11 in SMA 8. V splošnem se je elektromagnetna sonda na vseh plasteh pokazala kot primerna alternativa izotopski sondi. Meritve so bile sicer nekoliko manj natančne kot pri izotopski sondi, vendar še vedno dovolj natančne za sprotno spremljanje vgrajevanja bituminizirane zmesi in določanja slabo zgoščenih mest.

Pri tem je potrebno upoštevati tudi dejstvo, da elektromagnetna sonda ne zajame celotne debeline asfaltne plasti, ampak samo zgornjih cca 4 cm. Zato se je pojavil problem pri meritvah na bolj grobozrnati asfaltni plasti (AC 32), saj tam obstaja večja možnost, da naletimo na segregirano površino ali pa na večje zrno v zgornjem delu plasti. S tem dobimo meritve, ki se ne skladajo z dejansko zgoščenostjo plasti (ta problem se pojavlja tudi pri meritvah z izotopsko sondo, vendar je bolj izrazit pri elektromagnetni sondi). Proizvajalci sond poskušajo tudi ta problem rešiti s programsko opremo, ki upošteva največje zrno, ki se nahaja v asfaltni plasti in tako zmanjša velikost napake, ki se zgodi pri merjenju segregirane površine (sonda Trans Tech).

Vlaga: Vlaga še vedno predstavlja problem pri izvajanju meritev zgoščenosti z elektromagnetno sondo. Proizvajalci sond skušajo obvladovati prisotnost vlage s strojno in programsko opremo, ki z algoritmi preračunava vsebnost vlage ter jo upošteva pri izračunu zgoščenosti. Mi smo ugotovili, da se rezultati zgoščenosti z elektromagnetno sondo, ki se izvajajo na zelo mokri površini, popolnoma razlikujejo od dejanske zgoščenosti na istem mestu. Z brisanjem (osuševanjem) asfaltne površine se rezultati približajo rezultatom izotopske sonde (ki je veliko manj občutljiva na vlago) in pa asfaltnim vrtnam. Kljub temu

priporočamo, da se meritve z elektromagnetno sondo izvajajo v suhem vremenu in na suhi površini. Samo tako lahko z gotovostjo pričakujemo, da bodo rezultati meritev relevantni.

Drugi vplivi na meritve z elektromagnetno sondo: Proizvajalec sonde Troxler v svojih navodilih sicer opozarja na možnosti vplivov drugih elektromagnetnih sevanj na rezultate meritev zgoščenosti. Predvsem opozarjajo na uporabo mobilnega telefona ob izvajanju meritev z elektromagnetno sondo. Na podlagi naših preskusov ugotavljamo, da mobilni telefon ne vpliva na rezultate meritev (oziroma je vpliv zanemarljiv). Večja odstopanja pri meritvah smo opazili samo v primeru, kadar je telefon le nekaj centimetrov oddaljen od elektromagnetne sonde. Že oddaljenost 0,5 metra je dovolj, da se vplivi na meritvah ne poznajo.

Problem se lahko pojavi pri večjih oddajnikih elektromagnetnega sevanja, kot so visokonapetostni vodi, transformatorske postaje in oddajniki mobilne telefonije. Za takšne primere je bila elektromagnetna sonda še premalo preskušena, tako da se bo šele skozi leta in izkušnje izkazalo, kakšne vplive imajo vsi ti dejavniki na rezultate meritev. Prav tako se bo šele čez čas pokazalo, ali obstajajo tudi kakšni drugi dejavniki v okolju, ki lahko vplivajo na točnost meritve. V mislih imamo različne primesi v zmesi in kemijske elemente, ki se nahajajo v kamnitih zrnih in bi lahko vplivali na delovanje elektromagnetne sonde.

7 ZAKLJUČEK

Meritve zgoščenosti vroče bituminizirane zmesi ob vgradnji so eden od najpomembnejših parametrov za doseganje kakovosti vgrajene bituminizirane zmesi.

Do sedaj poznana in uporabljena metoda določanja zgoščenosti z izotopsko sondo je sicer dokaj natančna, vendar prinaša tudi veliko problemov. Zaradi radioaktivnega sevanja, ki ga izotopska sonda oddaja, je delo z njo relativno nevarno. Uporaba in delo z napravami, ki oddajajo ionizirajoče sevanje, sta z zakonodajo strogo nadzorovana in terjata neprestano usposabljanje in zdravstveni nadzor osebja, ki rokuje z izotopskimi sondami. Ti dejavniki pomenijo dodatno tveganje za zdravje ljudi ter večjo porabo časa in denarja za vzdrževanje naprav, kot to določa zakonodaja.

Zaradi vseh naštetih težav se je pojavila ideja za nedestruktivno metodo določanja zgoščenosti plasti brez uporabe nevarnih radioaktivnih sond. Proizvajalci naprav so tako predstavili novo vrsto naprav, ki delujejo na principu elektromagnetizma oziroma dielektričnosti materialov. Za tako imenovano elektromagnetno sondo ni potrebno dodatno izobraževanje, kar se tiče rokovanja, prevoza ter skladiščenja sonde. Prav tako je delo z njo hitrejše, lažje in z zdravstvenega vidika popolnoma varno.

V začetni fazi so nastajale z novimi vrstami sond velike težave pri natančnosti določanja zgoščenosti, predvsem zaradi vpliva vlage na površini asfaltne plasti.

Rezultati so bili zelo nenatančni in sonde še niso bile primerne za uporabo v praksi. V naslednjih letih so proizvajalci izboljševali algoritme za preračunavanje. Tako so v ZDA že pred desetletjem pričeli uporabljati elektromagnetno sondo tudi v praksi, v Evropi pa se je začela pojavljati šele v zadnjih letih.

V tej diplomski nalogi smo primerjali različne postopke določanja zgoščenosti vgrajene bituminizirane zmesi z namenom, da poskusimo ugotoviti, ali je nova metoda z elektromagnetno sondo dovolj natančna in zanesljiva, da bi lahko v prihodnosti popolnoma zamenjala metodo z izotopsko sondo.

Poskusi so se izvajali na različnih bituminiziranih zmesih v različnih debelinah. Izvajale so se meritve z izotopsko sondo, elektromagnetno sondo in preskusi na izvrtanih asfaltnih jedrih.

Vse rezultate, ki smo jih dobili z različnimi metodami, smo nato med seboj primerjali in ugotavljali, ali so med seboj primerljivi.

Pri izvajanju meritev smo prav tako opazovali, ali obstajajo kakšni zunanji dejavniki, ki lahko vplivajo na rezultate meritev. Predvsem nas je zanimalo, kako so proizvajalci rešili problem z vlago, ki je do sedaj predstavljala veliko oviro za hitrejšo uveljavitev elektromagnetnih sond.

Iz rezultatov izvedenih preskusov v tej diplomski nalogi lahko ugotovimo, da nobena nedestruktivna metoda (izotopska ali elektromagnetna sonda) ne more popolnoma nadomestiti določanja zgoščenosti izvrtanih asfaltnih jeder v laboratoriju. Lahko pa se izotopska kot tudi elektromagnetna sonda uporabljata kot učinkovit pripomoček za ugotavljanje konstantnosti zgoščanja vgrajevalnih strojev, nastavitve režimov valjanja za doseganje ustrezne zgoščenosti in votlavosti plasti. Z njeno uporabo se lahko natančneje locirajo segregirana ali slabo zgoščena področja že vgrajene asfaltne plasti.

Elektromagnetna sonda se je izkazala za primerno na vseh bituminiziranih zmesih. Predvsem je seveda potrebno paziti na bolj grobozrnatih zmesih (AC32, AC22), saj lahko zaradi večjih zrn v zmesi pride do napak pri meritvah, vendar se s pravilno izbiro izmerjenih mest lahko izognemo tudi tej težavi.

Proizvajalci so sicer v teh letih zelo izboljšali parametre in algoritme za upoštevanje vlage na asfaltni plasti, vendar tudi pri novejših sondah to še vedno ostaja problem. Da se izognemo napakam pri meritvah, moramo te opravljati na povsem suhi podlagi oz. v skrajnem primeru moramo površino, na kateri se meritev izvaja, dobro osušiti.

Med izvajanjem preskusov nismo ugotovili drugih vplivov iz okolja, ki bi znatno vplivali na rezultate meritev. Problem bi lahko predstavljali veliki oddajniki elektromagnetnega sevanja (oddajniki za mobilno telefonijo).

Na osnovi izvedenih preskusov v tej diplomski nalogi, izkušenj iz spremljanja vgradnje asfaltnih zmesi na terenu ter splošnega vedenja o uporabljenih napravah za nedestruktivno določanje zgoščenosti lahko povzamemo naslednje trditve:

- Elektromagnetna sonda Troxler pave tracker je primerna za spremljanje zgoščenosti bituminizirane zmesi pri vgrajevanju. Hitro lahko ugotovimo nepravilnosti v asfaltni plasti in ukrepamo za odpravo le-teh.

- Čeprav z elektromagnetno sondo ne dobimo tako točnih rezultatov kot z izotopsko sondo, je njena velika prednost varnostni in zdravstveni vidik uporabe. Ni se potrebno ubadati z regulativo, ki spremlja naprave z virom radioaktivnega sevanja. Prav tako je velika prednost, da poteka merjenje z elektromagnetno sondo hitreje in v krajšem času izvedemo veliko več meritev kot z izotopsko sondo.
- Kljub enostavnosti uporabe elektromagnetne sonde priporočamo, da le-to uporablja oseba z izkušnjami na področju asfaltnih zmesi, saj se lahko tako zelo hitro prepozna »ubežnike«, torej rezultate, ki jih zaradi različnih vzrokov ne upoštevamo v obdelavi dobljenih podatkov.
- Kalibracija sonde (izdelava umeritvene premice) je ključnega pomena za točne meritve z elektromagnetno sondo. Če je le možno, se kalibracija izvede na poskusnem polju. Prav tako so nam pri točnosti meritev lahko v veliko pomoč izkušnje ter poznavanje materialov, ki so v asfaltni zmesi.

Ker je elektromagnetna sonda dokaj nova metoda določanja zgoščenosti asfaltnih plasti, se bodo šele skozi izkušnje in leta uporabe izkazale vse prednosti in slabosti tega načina določanja zgoščenosti.

Edina res zanesljiva metoda za določitev točne zgoščenosti asfaltne plasti je merjenje zgoščenosti izvrtanih asfaltnih jeder, ki se analizirajo v laboratoriju.

8 LITERATURA IN VIRI

Literatura:

1. Romero, P.: *Evaluation of non-nuclear gauges to measure density of hot-mix asphalt pavements*, The university of Utah, Department of civil and environment engineering, ZDA, 2002.
2. Ferlič S., Lukač B.: *Neporušne metode za merjenje zgoščenosti asfaltne plasti – elektromagnetna sonda*; Zbornik 10, Kongres o cestah in prometu, Portorož, 2010.

Viri:

1. American Society for Testing and Materials, *ASTM D7113-09: Standard test method for density of Bituminous paving mixtures in place by the electromagnetic surface contact method*, ZDA, 2009.
2. GIZ Gradis: *Interno gradivo-Izotopska sonda-navodila*, Maribor (letnica izdaje neznana).
3. Republika Slovenija – Ministrstvo za promet, *TSC 06.300/06.410:2009: Smernice in tehnični pogoji za graditev asfaltnih plasti*, Uradni list RS, št 65/09., Direkcija Republike Slovenije za ceste, Ljubljana, 2009.
4. Republika Slovenija, Ministrstvo za promet, *TSC 06.711:2001: Meritve gostote in vlage – postopek z izotopskim merilnikom*, Direkcija Republike Slovenije za ceste, Ljubljana, 2001.
5. Slovenski standard *SIST EN 12697 – 30:2004+A1:2007; Bitumenske zmesi – Preskusne metode za vroče asfaltne zmesi - 30. del: Priprava preskušancev z udarnim zgoščevalnikom*, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2007.
6. Slovenski standard *SIST EN 12697 – 6:2004+A1:2007 Bitumenske zmesi, preskusne metode za vroče asfaltne zmesi, 5. del – Ugotavljanje gostote bitumenskih preskušancev*; Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2007.
7. Združenje Asfalterjev Slovenije: *Asfalt*, ZAS, Ljubljana, 2006.

Internetni viri:

1. <http://www.troxlerlabs.com/PRODUCTS/2701b.shtml>; dne 10. 5. 2011
2. <http://sl.wikipedia.org/wiki/Dielektričnost>; dne 5. 2. 2011
3. <http://en.wikipedia.org/wiki/Dielectric>, dne 5. 2. 2011
4. http://teraidea.com/index.php/gradbeni_elementi/uporabni_materiali/kategorija/asfalt/; dne 10. 5. 2011
5. <http://www.fg.uni-mb.si/lucija/Gradiva-A/3-06%20Asfalt.pdf>; dne 8. 3. 2011
6. <http://www.scribd.com/doc/7629908/Compaction-of-Asphalt-Road-Pavements>; dne 2. 5. 2011
7. <http://www.gradbenik.eu/index.php?/sl/Gradnja/Asfalt-v-gradnji-cest>; dne 2. 5. 2011
8. <http://www.fhwa.dot.gov/everydaycounts/technology/asphalt/multimedia.cfm>; dne 10. 5. 2011
9. <http://en.wikipedia.org/wiki/Bitumen>, z dne 25.5.2011
10. <http://wapedia.mobi/de/Asphalt>, z dne 25.5.2011
11. <http://petabyte.me/tehnoput/index.php/mehanizacija>, z dne 2.5.2011
12. <http://www.asfalti-ptuj.si/galerija.htm>, z dne 2.5.2011
13. <http://www.exelscientific.org/en/>, z dne 8.5.2011
14. http://training.ce.washington.edu/WSDOT/Modules/07_construction/electrical_gauge.htm z dne 2.5.2011
15. Vir:<http://equipment.forconstructionpros.com/product/10146917/roxler-equipment/troxler-nuclear-surface-gauges>, z dne 2.5.2011
16. http://www.onestoptesting.co.uk/TransTech_Systems_Inc_PQI_380, z dne 5.5.2011