

**Ministerstvo dopravy a výstavby SR
Sekcia cestnej dopravy a pozemných komunikácií**

KONTROLA ZHUTNENIA ZEMÍN A SYPANÍN NOVÝMI SKÚŠOBNÝMI METÓDAMI

ROZBOROVÁ ÚLOHA

2022

OBSAH

1	Všeobecné údaje	3
2	Cieľ rozborovej úlohy (RÚ)	3
2.1	Distribúcia RÚ	3
2.2	Súvisiace a citované právne predpisy	3
2.3	Súvisiace a citované normy	3
2.4	Súvisiace a citované Technické predpisy rezortu	3
2.5	Súvisiace zahraničné predpisy	4
2.6	Použitá literatúra	4
2.7	Použité skratky	5
3	Úvod	6
4	Prehľad normalizovaných a nenormalizovaných metód skúšania vlastností zemných konštrukcií a podkladových vrstiev vozoviek	6
4.1	Geosonda Humboldt 4140	9
4.2	Cleggovo kladivo CIST	21
4.3	Elektrická metóda merania miery zhutnenia	22
4.4	Penetračné metódy	27
4.5	Metóda BCD	29
4.6	Dynamická kontinuálna metóda – metóda CCC	30
4.7	Návrhy na validáciu a implementáciu nenormalizovaných metód v kontrolno-skúšobnej praxi	32
4.8	Korelácie modulov deformácie zo statickej a dynamickej zaťažovacej skúšky	34
5	Záver	37

1 Všeobecné údaje

Objednávateľ:	Slovenská správa ciest
Zhotoviteľ:	Žilinská univerzita v Žiline, Stavebná fakulta
Doba riešenia:	jún – november 2022
Riešiteľ:	doc. Dr. Ing. Katarína Zgútová doc. Ing. Juraj Šrámek, PhD. RNDr. Boris Starší – KVALITEST Ing. Matej Starší – KVALITEST

2 Cieľ rozborovej úlohy (RÚ)

Cieľom RÚ je vypracovať štúdiu pre použitie nových metód kontroly kvality zhutnenia zemín a sypanín pri zhotovovaní cestného telesa a podkladových vrstiev vozovky.

2.1 Distribúcia RÚ

Elektronická verzia RÚ sa zverejní na webovom sídle SSC: www.ssc.sk

2.2 Súvisiace a citované právne predpisy

- [Z1] Zákon č. 135/1961 Zb. o pozemných komunikáciách (cestný zákon), v znení neskorších predpisov;
[Z2] vyhláška FMD č. 35/1984 Zb., ktorou sa vykonáva zákon o pozemných komunikáciách (cestný zákon).

2.3 Súvisiace a citované normy

STN ISO 5725-1	Presnosť (správnosť a zhodnosť) metód a výsledkov merania. Časť 1: Všeobecné zásady a definície
STN EN ISO/IEC 17025	Všeobecné požiadavky na kompetentnosť skúšobných a kalibračných laboratórií
STN EN ISO 17892-1	Geotechnický prieskum a skúšky. Laboratórne skúšanie zemín. Časť 1: Stanovenie vlhkosti
STN EN ISO 22476-2	Geotechnický prieskum a skúšanie. Terénne skúšky. Časť 2: Dynamické penetračné skúšky
STN P CEN/TS 17006	Zemné práce. Plynulá kontrola zhutnenia
STN 73 6133	Stavba ciest. Teleso pozemných komunikácií
STN 73 6190	Statická zaťažovacia skúška stavebných konštrukcií doskou
STN 73 6192	Rázová zaťažovacia skúška vozoviek a podložia
STN 73 1375	Rádiometrické skúšanie objemovej hmotnosti a vlhkosti
STN 72 1010	Stanovenie objemovej hmotnosti zemín. Laboratórne a poľné metódy.

Poznámka: Súvisiace a citované normy vrátane aktuálnych zmien, dodatkov a národných príloh.

2.4 Súvisiace a citované Technické predpisy rezortu

[T1]	TP 004	Použitie ťaženého predrveného kameniva v nestmelených vrstvách konštrukcií vozoviek;
[T2]	TP 028	Vykonávanie inžinierskogeologického prieskumu pre cestné stavby;
[T3]	TP 033	Navrhovanie netuhých a polotuhých vozoviek;
[T4]	TP 098	Navrhovanie cementobetónových vozoviek na cestných komunikáciach;
[T5]	TP 107	Diagnostika stavu zemného telesa a odvodnenie vozovky;
[T6]	TKP 2	Zemné práce;
[T7]	TKP 5	Podkladové vrstvy z nestmelených a hydraulicky stmelených zmesí;
[T8]	TKP 27	Zlepšovanie a stabilizácia zemín;
[T9]	TKP 31	Zvláštne zemné konštrukcie;
[T10]	VL 2	Teleso pozemných komunikácií.

Poznámka: Súvisiace a citované Technické predpisy rezortu v platnom znení vrátane dodatkov.

2.5 Súvisiace zahraničné predpisy

- [ZP1] ASTM D 6758-02 Standard Test Method For Measuring Stiffness And Apparent Modulus Of Soil And Soil-Aggregate In-Place By An Electro-Mechanical Method (Štandardná skúšobná metóda na meranie tuhosti a zdanlivého modulu zeminy a zeminovo-kamenistej zmesi na mieste elektromechanickou metódou)
- [ZP2] ČSN 72 1006 Kontrola zhutnění zemin a sypanin.

2.6 Použitá literatúra

- [L1] Belincanta A.- Lukiantchuki J.A.- Reis J.H.C. Control of soil compaction in pavement layers: A new approach using the dynamic cone penetrometer (DCP) Geotechnical and Geophysical Site Characterisation 5 (Kontrola zhutnenia pôdy vo vrstvách vozovky: Geotechnická a geofyzikálna charakteristika územia 5)– Lehané, Acosta-Martínez & Kelly (Eds) © 2016 Australian Geomechanics Society, Sydney, Australia, 5 s. ISBN 978-0-9946261-1-0;
- [L2] BOMAG compaction measurement and documentation systems. The transparent construction site up close (Systémy na meranie a dokumentáciu zhutňovania BOMAG. Transparentné stavenisko zblízka). Bomag Fayat Group, 2018, 12s., www.bomag.com;
- [L3] Briaud J.-L., Rhee K. Y., Saez D. THE BCD: A NEW INSTRUMENT FOR COMPACTION CONTROL (BCD: NOVÝ NÁSTROJ NA KONTROLU ZHUTŇOVANIA). IDEA Program Final Report, Texas Transportation Institute, 2009, 39 s;
- [L4] Čorej, J.- Decký, M. - Komačka, J.- Schlosser, F.- Remišová, E.- Valuch, M.- Gavulová, A.- Mučka, P. Mechanika vozoviek. Navrhovanie vozoviek a spevnených plôch. 1.vydanie. Žilina: EDIS-vydavateľstvo ŽU, 2001. s.350. ISBN 80-7100-862-1;
- [L5] Decký, M. a kol. (2019): Navrhovanie a rehabilitácie vozoviek pozemných komunikácií. Skriptá, EDIS - vydavateľstvo ŽU 2019, s. 336, ISBN 978-80-554-1615-1.
- [L6] Decký, M. - Drusa, M. - Papán, D. - Šrámek, J. (2022). The relationship between dynamic and static deformation modulus of unbound pavement materials used for their quality control methodology (Vzťah medzi dynamickým a statickým deformačným modulom nestmelených materiálov vozoviek, ktorý sa používa pre metodiku kontroly ich kvality). Materials, 15(8), 2922.
- [L7] Decký, M. - Drusa, M. - Remišová, E. - Drevený, I. (2015): Indirect testing methods for compaction degree detecting of earth structures of the airfield areas (Metódy nepriameho testovania na zisťovanie stupňa zhutnenia zemných štruktúr na letiskových plochách). In Aero-Journal 2/2015 In: Aero-Journal. Vedecký časopis Vydávaný KLD, ŽUŽ, 2/2015, ISSN 1338-8215.
- [L8] Decký, M. - Papanova, Z. - Juhas, M. - Kudelcikova, M. (2022). Evaluation of the Effect of Average Annual Temperatures in Slovakia between 1971 and 2020 on Stresses in Rigid Pavements (Hodnotenie vplyvu priemerných ročných teplôt na Slovensku v rokoch 1971 až 2020 na napätia v tuhých vozovkách). Land, 11(6), 764.
- [L9] Decký, M. - Remišová, E. a kol (2015). In situ determination of load bearing capacity of soils on the airfields (Stanovenie únosnosti pôdy na letiskách in situ). Procedia Earth and Planetary Science, 15, 11-18.
- [L10] Decký, M. - Zgútová, K. - Pitoňák, M. (2011): Kontrola kvality zhutnenia zemných konštrukcií dopravných stavieb. In Silniční obzor, 4/2011, s. 101-108, ISSN 0322-7154.
- [L11] Decký, M. - Starší, B. - Šrámek, J. - Drusa, M. (2021): Korelácie statických a dynamických charakteristík kontroly kvality zhutnenia nestmelených konštrukcií vozoviek. In Inžinierske stavby. ISSN 1335-0846, Roč. 69, Č. 3 (2021), S. 36-39.
- [L12] Decký, M. - Zuzulová, A. a kol (2020): Cementobetónové vozovky a spevnenia dopravných plôch. Navrhovanie, posudzovanie, materiály, poruchy, rehabilitácie, BIM. Vysokoškolská učebnica, 2. prepracované vydanie, Žilinská univerzita v Žiline, EDIS – vydavateľské centrum ŽU 2020, s.401, ISBN 978-80-554-1487-4.
- [L13] Drusa, M. - Decký, M.- Marschalko, K.- Zgútová, K.-Trojanová, M.-Vangel, J.- Kubík, B.-Starší, B. Navrhovanie a kontrola zemných konštrukcií dopravných stavieb. 1.vydanie. Žilina: EDIS-vydavateľstvo ŽU, 2013. s.522. ISBN 978-80-554-1;
- [L14] Ďureková, D., Zgútová K.: Prvé experimentálne výsledky z meraní na skúšobnom poli pomocou geosondy Humboldt H-4140. Zborník z Konferencie skoušení a jakost ve stavebnictví. Brno, VUT, 2013, 440 s., ISBN 978-80-214-4777-6;
- [L15] Herrera Camilo, Caicedo Bernardo. Finite Difference Time Domain Simulations of Dynamic Response of Thin Multilayer Soil in Continuous Compaction Control (Simulácie dynamickej odozvy tenkej viacvrstvovej pôdy v časovej oblasti s konečnou diferenciou pri kontinuálnej kontrole zhutňovania). The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016), 7 s;

- [L16] HUMBOLDT MFG. CO., Geogauge™ User Guide (Používateľská príručka), Model H – 4140. Norridge, IL. 60706, U.S.A., 2007;
- [L17] Khalid A. Alshibli, Murad Abu-Farsakh. Laboratory Evaluation of the Geogauge and Light Falling Weight Deflectometer as Construction Control Tools (Laboratórne hodnotenie geomeru a deflektometra s ľahkým padajúcim závažím ako nástrojov kontroly výstavby), Article in Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 11 s;
- [L18] Lee Petersen, D. CONTINUOUS COMPACTION CONTROL MnROAD DEMONSTRATION (KONTINUÁLNA KONTROLA ZHUTNENIA MnROAD DEMONSTRATION). CNA Consulting Engineers Minneapolis, 2005, 139 s;
- [L19] Lee Petersen, Ryan Peterson, Charles Nelson. Comparison of Quasi-Static Plate Load Tests with the Humboldt GeoGauge / Porovnanie kvázi statických testov zaťaženia dosiek s prístrojom Humboldt GeoGauge);
- [L20] McKayne Ryan. In situ field testing of mechanical properties (Testovanie mechanických vlastností in situ). University of Minesota, 48. výročná geotechnická konferencia, 2000, 17 s;
- [L21] MODIFICATION OF THE CLEGG HAMMER AS AN ALTERNATIVE TO NUCLEAR DENSITY GAUGE TO DETERMINE SOIL COMPACTION (MODIFIKÁCIA CLEGGOVHO KLADIVA AKO ALTERNATÍVY K JADROVÉMU HUSTOMERU NA STANOVENIE ZHUTNENIA PÔDY). Final report. Gas Technology Institute Des Plaines, Illinois, 2006, 36 s. CNA Consulting Engineers Minneapolis, 2002, 9 s;
- [L22] Pistol J., Villwock S., Volkel W., Kopf F., Adam D.: Continuous Compaction Control (CCC) with Oscillating Rollers (Kontinuálna kontrola zhutňovania (CCC) s oscilačnými valcami). The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016), 8 s;
- [L23] Rathje Ellen M. a kol. Evaluation of Non-Nuclear Methods for Compaction Control (Hodnotenie nejadrových metód kontroly zhutňovania). Center for Transportation Research The University of Texas at Austin, 2006, 143 s;
- [L24] Remišová, E. - Decký, M. a kol (2016). Design of road pavement using recycled aggregate (Návrh vozovky s použitím recyklovaného kameniva). In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 44, No. 2, p. 022016). IOP Publishing.
- [L25] Rosinová, D. a Dúbravská, M.: Optimalizácia. 1. vydanie. Bratislava : Vydavateľstvo STU, 2008. s. 195. ISBN 978-80-227-2795-2;
- [L26] Starší, Boris. Diagnostika podložia homogenizovanej vrstvy s použitím metódy podľa STN P CEN/TS 17006. Zborník z IX. Konferencie Nestmelené a hydraulicky stmelené vrstvy vozoviek. Košice: Dom techniky, 2018, 95s. ISBN 978-80232-0337-0;
- [L27] Starší, Boris. Diagnostika podložia a podkladových vrstiev vozovky v činnosti stavebného dozora. Zborník z I. Konferencie Nestmelené a hydraulicky stmelené vrstvy vozoviek. Košice: Dom techniky, 2010, 95s. ISBN 978-80-232-0305-9;
- [L28] Starší, Matej. Kontrola kvality zemných konštrukcií v zložitých geotechnických podmienkach: bakalárska práca. Žilina : Žilinská univerzita, 2019. 46 s;
- [L29] Starší Matej: Použitie korelačných vzťahov pri vyhodnotení nedeštruktívneho merania vo vzťahu k nenormovým metódam zemných konštrukcií, [diplomová práca, Žilinská univerzita v Žiline, 2022].;
- [L30] Šoltés, Erik. Regresná a korelačná analýza s aplikáciami. 1.vydanie. Bratislava : Iura Edition, 2008. s.297. ISBN 978-80-8078-163-7;
- [L31] Špurek, Josef. Silniční stavitelství II. Stavba silnic a dálnic. Praha: SNTL, 1979, s.525;
- [L32] Šrámek, J. - Decký, M. a kol. (2021): Trvaloudržateľná výstavba a správa tunelových vozoviek. Skriptá, Žilinská univerzita v Žiline, EDIS – vydavateľské centrum ŽU 2021, s.349, ISBN 978-80-554-1791-2.
- [L33] Zgútová, K., Decký, M., Šrámek, J., & Drevený, I. (2015). Using of alternative methods at earthworks quality control (Používanie alternatívnych metód pri kontrole kvality zemných prác.). Procedia Earth and Planetary Science, 15, 263-270.
- [L34] Yangfeng Li.: USE OF A BCD FOR COMPACTION CONTROL (POUŽITIE BCD NA KONTROLU ZHUTŇOVANIA). A Dissertation Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University. 2004, 232 s.

2.7 Použité skratky

BCD	Zhutňovacie zariadenie Briaud (Briaud Compaction Device)
CBR	Kalifornský pomer únosnosti (California bearing ratio)
CIST	Cleggov nárazový prístroj
HKS	Hlinito-kamenitej sypaniny
LDD	Ľahká dynamická doska

NMS	Normalizovaná skúšobná metóda
PKZ (CCC)	Plynulá kontrola zhutnenia
RÚ	Rozborová úloha
RVT	Rozvoj, veda a technika
TKP	Technicko-kvalitatívne podmienky
TP	Technické podmienky
TPR	Technické predpisy rezortu
ZSC	Zemina stabilizovaná cementom

3 Úvod

Novými metódami pri kontrole kvality zhutnenia zemín a sypanín sú označované terénne merania a skúšky, ktoré zatiaľ nie sú publikované v sústave slovenských technických noriem, ale sú dostatočne prezentované a publikované v domácej aj zahraničnej odbornej literatúre a mnoho z nich sa už používa v praxi aj v Slovenskej republike ako nenormalizované metódy pre informatívne a porovnávacie merania. V posledných desaťročiach spolu s búrlivým rozvojom elektroniky a informačných technológií prichádza k prieniku nových skúšobných metód aj do pomerne konzervatívnej oblasti stavebného skúšobníctva, kde sú stále používané, takmer sto rokov staré „klasické“ mechanické metódy skúšania. Tieto metódy sú konfrontované s novými nedeštruktívnymi metódami, využívajúcimi pri zisťovaní parametrov zemných konštrukcií elektronické senzory a hromadné spracovanie dát pomocou moderného softvéru. Postupom času vznikajú nové meracie prístroje ale aj úplne nové princípy merania vlastností zemných konštrukcií. Zavádzanie novej skúšobnej techniky do praxe je limitované pomalými procesmi normotvornej činnosti, kde z objektívnych aj subjektívnych dôvodov dochádza k meškaniu inovácie alebo vzniku noriem pokrývajúcich nové skúšobné metódy. V týchto prípadoch skúšobné laboratóriá používajú buď všeobecné korelačné vzťahy známe z odbornej literatúry alebo si z vlastných porovnávacích meraní vytvárajú databázy hodnôt a korelačné vzťahy, pomocou ktorých validujú a verifikujú uvedené postupy. Problémom tohto postupu je, že zákazník alebo kontrolný orgán investora stavby, napr. stavebno-technický dozor, nemusí a často neuznáva výsledky nenormalizovaných metód a v lepšom prípade ich považuje len za orientačné, informatívne alebo doplnujúce, k výsledkom požadovaných normalizovaných skúšok. Použitie nenormalizovaných, inovatívnych metód kontroly zhutnenia nám umožňuje ustanovenie cestného zákona č. 135/1961 Zb, kde v § 2 Plánovanie, príprava a výstavba pozemných komunikácií, ods. (4) Navrhovanie pozemných komunikácií sa vykonáva podľa platných slovenských technických noriem, technických predpisov, objektívne zistených výsledkov výskumu a vývoja pre cestnú infraštruktúru alebo obdobných technických špecifikácií. Uvedené ustanovenie cestného zákona umožňuje priamy transfer výstupov tejto RÚ do technickej praxe. Tento prístup, ako už bolo uvedené je v zmysle platnej legislatívy v poriadku, spomaľuje alebo úplne blokuje proces inovácií v oblasti skúšobníctva a častokrát je aj úplne kontraproduktívny v oblasti kontroly kvality zemných konštrukcií. Nové digitalizované metódy merania v mnohých prípadoch poskytujú v krátkom čase veľké množstvo cenných informácií a dát o kontrolovanej konštrukcii, ktoré tradičné bodové metódy nemôžu poskytnúť. Tým, že sú nové a moderné metódy nedostatočne využité z dôvodu chýbajúcich noriem, môže dochádzať k veľkým finančným stratám a škodám, ktoré znižujú efektívnosť finančných investícií do dopravnej a inej infraštruktúry štátu.

V tejto RÚ sa autori zamerali na podrobnú rešerš súvzťažných publikácií slovenských autorov, ktorí v citovaných prácach uvádzajú najvýznamnejšie práce zahraničných autorov. Zámerom a cieľom autorov tejto RÚ nie je formálne popísanie čo najväčšieho počtu existujúcich nových skúšobných metód používaných vo svete a rešeršovanie existujúcich noriem, ale predovšetkým vypracovanie metodiky pre bežné používanie nových metód v praxi a príprava podkladov pre vypracovanie potrebnej podpornej dokumentácie v blízkej budúcnosti, akou sú slovenské technické normy alebo technické predpisy rezortu.

4 Prehľad normalizovaných a nenormalizovaných metód skúšania vlastností zemných konštrukcií a podkladových vrstiev vozoviek

Normalizované metódy používané v Slovenskej republike na skúšanie zemných konštrukcií sú popísané v STN a STN EN, ktoré sú uvedené v kapitole 2.6. Pre niektoré metódy, napríklad statickú zaťažovaciu skúšku, rádiometrickú metódu alebo metódu CCC, sú vypracované samostatné normy, v ostatných prípadoch sú tieto metódy súčasťou noriem, ktoré obsahujú viac skúšobných metód, napríklad dynamickú zaťažovaciu skúšku, terénne skúšky objemovej hmotnosti zemín a vlhkosti zemín alebo sú v základných rysoch popísané v technologických normách, napr. geodetická metóda a iné. V niektorých normách a odbornej literatúre sa používa triedenie terénnych skúšobných metód na priame a nepriame metódy, pričom medzi priame metódy sa zaraďujú metódy merania

objemovej hmotnosti zeminy metódou vyrezávacích valcov alebo jamkové metódy s použitím rôznych druhov objemomerov (mebránový, pieskový). Medzi nepriame metódy sa spravidla zaraďujú všetky druhy zaťažovacích skúšok, geodetická metóda, rádiometrická metóda, penetračné metódy a podobne. Treba poznamenať, že toto rozdelenie už považujeme za prekonané, pretože je relatívne a vzťahuje sa na typ kontrolovaného parametra. Historicky najstarším kontrolným parametrom pri kontrole zhutnenia zemných konštrukcií boli hodnoty objemovej hmotnosti zeminy v súvislosti s vlhkosťou zeminy. V čase vzniku kontrolných metód bolo známe len meranie tým spôsobom, že bola odobratá vzorka zeminy z konštrukcie a určená jej objemová hmotnosť a dodatočne vlhkosť sušením.

S nástupom iných typov merania objemovej hmotnosti zeminy, napríklad rádiometricky prežarovaním ionizujúcim žiarením, bola snaha tieto metódy principiálne odlíšiť, preto boli zavedené termíny priame a nepriame metódy. Tento postup bol logický, pretože išlo o meranie rovnakých parametrov zeminy principiálne rozdielnym spôsobom. S nástupom metód merajúcich deformačné parametre zemných konštrukcií už zaniká priama logická súvislosť medzi členením na priame a nepriame metódy, pretože pri meraní deformačných parametrov zaťažovacou skúškou sú spravidla aj kontrolné parametre určené v tých istých veličinách a merných jednotkách. Spočiatku bola snaha korelovať kontrolné parametre naviazané na priame metódy, napr. Proctor štandard alebo Proctor modifikovaný na hodnoty modulov deformácie, čo sa prejavilo aj v normách, napr. STN 72 1006 Kontrola zhutnenia zemín a sypanín, ktorá bola zrušená v roku 2017 a objavuje sa ešte napríklad v platnej českej norme ČSN 72 1006. Rozdelenie na priame a nepriame skúšobné metódy bolo čiastočne zmenené revíziou normy STN 73 6133, kde boli zaradené statické zaťažovacie skúšky medzi priame metódy, a to predovšetkým z dôvodu, že kontrolné hodnoty pre rôzne typy a časti zemných konštrukcií a podkladových vrstiev vozoviek sú v normách a projektovej dokumentácii stále častejšie špecifikované priamo deformačnými parametrami, to znamená v hodnotách modulu deformácie, modulu pružnosti alebo modulu reakcie. Pokiaľ je kontrolná hodnota špecifikovaná takýmto spôsobom, ide v prípade statickej zaťažovacej skúšky o priame meranie týchto parametrov. Prehľad „normových“ metód zavedených v súčasnosti platných STN je uvedený v tabuľke 1. Metódy sú v tabuľke 1 uvedené predovšetkým podľa normového názvu a používaných meracích prístrojov, nakoľko princíp merania aj výstupné parametre skúšky sú v mnohých prípadoch spoločné a metódy sa odlišujú len technickými podrobnosťami vykonávania, čiže pôsobenia na predmet skúšania alebo použitého pracovného postupu. V literatúre sa okrem vyššie uvedeného delenia na priame a nepriame metódy, používa aj delenie na deštruktívne a nedeštruktívne metódy, v prípade diagnostiky vozoviek klasifikujeme metódy podľa fyzikálneho pôsobenia na konštrukciu, napr. metódy mechanickej impedancie, fázových rýchlostí, ultrazvukové, impulzové a priehybové s využitím mechanických alebo optických meradiel [L4].

Spoločným znakom metódy vyrezávacieho valca a jamkovej metódy je priame meranie objemovej hmotnosti materiálu v zemnej konštrukcii, určením hmotnosti a objemu odobratej vzorky. Súčasťou tejto skúšky je aj meranie vlhkosti odobratej vzorky metódou sušenia v laboratórnych alebo terénnych podmienkach, alebo inou validovanou alternatívnou metódou. Hodnota zistenej objemovej hmotnosti sa porovnáva s hodnotou stanovenou laboratórnou skúškou zhutniteľnosti, napr. metódou Proctor alebo metódou relatívnej uľahnutosti (hutnosti) podľa čoho sa určuje miera zhutnenia zeminy vyjadrená súčiniteľ zhutnenia D alebo súčiniteľom účinnosti zhutňovacieho stroja C .

K zatriedeniu skúšobných metód medzi normalizované a nenormalizované je potrebné ešte dodať, že zohľadňuje súčasný stav v tejto problematike. V poslednom období sa do sústavy STN zavádzajú nové európske normy aj z oblasti terénnych geotechnických skúšok, používané v geotechnickom a inžinierskogeologickom prieskume ako napr. presiometria, karotáž, dynamická a statická penetrácia, vrtuľková skúška a podobne, preto môžeme predpokladať, že sa v normách postupom času objavajú aj tie metódy, ktoré sú v tejto práci prezentované ako nenormalizované. To je však len začiatok procesu ich zavedenia do praxe, pretože na tieto normy musia nadväzovať normy definujúce parametre konštrukcií, materiálov a technologické postupy s využitím výstupných parametrov novo zavedených metód a to je technický aj časovo náročný proces. Preto možnosť validácie nových metód podľa už osvedčených a dlhodobo používaných metód bude ešte dlho užitočná a potrebná pracovná metóda pre ktorú existuje dostatok platných noriem a postupov.

Tabuľka 1 - Prehľad metód normalizovaných v sústave STN

Názov metódy	Norma	Meracie prístroje	Výstupné parametre
Metóda vyrezávacieho krúžku (valca)	STN 72 1010	Oceľový vyrezávací valec, váha, zariadenia na meranie vlhkosti zeminy, mechanické pomôcky na zarážanie a vyberanie valca s odobratou vzorkou	Objemová hmotnosť zeminy
Jamková metóda	STN 72 1010	- Membránový objemomer, - Pieskový objemomer, - Zariadenie na skúšku naliatím kvapaliny, - Zariadenie na geometrickú metódu mernej jamy	Objemová hmotnosť zeminy
Rádiometrická metóda	STN 72 1010 STN 73 1375 STN 73 6133	-Radičný hutnomer napr. Troxler, Humboldt...	Objemová hmotnosť zeminy Vlhkosť zeminy
Geodetická metóda	STN 73 6133	Zariadenie na niveláciu	Priemerná hodnota stlačenia vrstvy, pomer stlačenia vrstvy k celkovej hrúbke vrstvy
Statická zaťažovacia skúška doskou	STN 73 6190	Súbor zariadení na postupné zaťažovanie a meranie priehybu vrstvy pri definovanom zaťažení	Moduly deformácie, modul pružnosti, modul reakcie, priehyb povrchu vrstvy
Dynamická zaťažovacia skúška ľahkou dynamickou doskou	STN 73 6192	Zariadenie typu LDD, LWD alebo FWD	Dynamický modul deformácie
Dynamická kontrola zhutňovania kompakto merom (plynulá kontrola zhutnenia, metóda CCC)*	STN 73 6133 STN P CEN/TS 17006	Zariadenie na plynulú kontrolu zhutnenia inštalovaný na zhutňovacom prostriedku (kompakto mer)	Bezrozmerná veličina (BMV) alebo dynamický modul deformácie

* Poznámka: metóda CCC je v štádiu predbežnej európskej normy a v STN je tiež popísaná len v základných rysoch, čo obmedzuje jej širšie využitie, preto sa jej podrobnejšie venujeme aj v popise nenormalizovaných metód.

V nasledujúcich podkapitolách podrobnejšie popisujeme tie nenormalizované skúšobné metódy, ktoré sa už v určitej miere používajú aj v našich podmienkach alebo sú perspektívne pre použitie.

4.1 Geosonda Humboldt 4140

Skúšobnú metódu, ktorá sa vykonáva zariadením od spoločnosti HUMBOLDT s názvom geosonda H-4140 môžeme zaradiť z hľadiska princípu merania k dynamickým metódam. Je to prenosný elektronický merací prístroj na určenie deformačných charakteristík zemných konštrukcií a vrstiev konštrukcie vozovky. Podľa popisu výrobcu uvedenom v manuáli prístroja [L16] je možné túto skúšobnú metódu charakterizovať ako dynamickú metódu s využitím princípu mechanickej impedancie [L14, L18]. Geosonda meria mechanickú impedanciu skúšanej vrstvy, resp. meria vibračný tlak prenášaný na povrch vrstvy a výslednú povrchovú rýchlosť ako funkciu času. Mechanická impedancia je veličina, ktorá charakterizuje odpor prostredia proti zmene jeho tvaru, alebo odpor prostredia proti pohybu telesa v ňom. Skúšobný prístroj počas merania generuje elektromagnetickú energiu na úrovni 25 frekvencií v rozsahu od 100 Hz do 196 Hz, v jednom meracom intervale. Merací interval trvá 75 sekúnd a počas neho sonda vykoná 7 400 meracích cyklov. Sonda váži 10 kg, kontakt sondy a povrchu vrstvy zabezpečuje kovový prstenec priemeru 130 mm, ktorý by mal mať minimálny kontakt na 60 % kontaktnej plochy prstenca na povrchu skúšanej konštrukcie. Počas merania vibrácie prenášané zo sondy do meranej vrstvy spôsobujú mikroposuny zŕn materiálu vrstvy (hodnoty $< 1,27 \cdot 10^{-6}$ m), čo spôsobuje zvislé pohyby prstenca, ktoré sú senzormi sondy merané a následne vyhodnocované procesorom sondy. Výstupné parametre každého meracieho intervalu sú:

- **modul pružnosti**, označovaný v manuáli výrobcu ako Youngov modul v zmysle Hookovho zákona pre izotropný, lineárne pružný materiál. Geosonda meria hodnotu modulu v rozsahu od $26,2 \text{ MN.m}^{-2}$ do 610 MN.m^{-2} , pričom pre naše účely s potrebou odlíšenia od iných porovnávaných deformačných charakteristík ho označujeme ako E_H (modul pružnosti určený geosondou Humboldt). Mechanické správanie sa partikulárnych látok, t.j. zemín, sypanín, stmelených vrstiev a podobných materiálov, je nielen nelineárne a nevratné z hľadiska priestorovej deformácie, ale je navyše aj závislé na aktuálnom usporiadaní zŕn (častíc), stavu napätosti a jeho histórii a na histórii pretvorenia materiálu. Vzhľadom na vyššie uvedené, považujeme, na rozdiel od výrobcu geosondy, meranú veličinu E_H skôr za modul deformácie zisťovaný dynamickou metódou čo naznačujú aj reálne namerané hodnoty na rôznych druhoch materiálov, ktoré sa nominálnymi hodnotami blížia viac k hodnotám deformačných modulov zisťovaných inými metódami ako k hodnotám modulu pružnosti.
- **tuhosť**, veličina meraná v rozsahu od 3 MN.m^{-1} do 70 MN.m^{-1} , pričom pre naše účely s potrebou odlíšenia od iných porovnávaných deformačných charakteristík ho označujeme ako k_H (koeficient tuhosti zistený geosondou Humboldt).

Hĺbka dosahu merania uvedených charakteristík je definovaná v rozsahu do 310 mm od povrchu vrstvy, koeficient variácie presnosti merania 10 %. Výrobca deklaruje vhodnosť použitia prístroja na súdržné a nesúdržné zeminy, hydraulickými spojivami stmelené podkladové vrstvy, asfaltové vrstvy a podobné materiály, pričom nie je definovaná veľkosť maximálneho zrna skúšaného materiálu. Prístroj je vybavený funkciou samokalibrácie na kovovom kalibračnom valci. Prístroj a jeho použitie je v súlade s normou ASTM D 6758-02. Vzhľadom na to, že použitie tohto zariadenia nie je doposiaľ definované v žiadnej STN, používa sa predovšetkým na informatívne merania alebo doplnujúce merania v prípade funkčnej korelácie s niektorou normalizovanou skúšobnou metódou, napríklad statickou zaťažovacou skúškou, dynamickou zaťažovacou skúškou alebo priamou metódou merania objemovej hmotnosti a vlhkosti zemín. Príklady týchto korelácií sú uvedené v nasledujúcich grafoch a tabuľkách.



Obrázok 1 - Porovnávacie meranie medzi geosondou Humboldt a radiačným hutnomerom Troxler



Obrázok 2 - Meranie deformačných parametrov zeminy v kopanej sonde dynamickou zaťažovacou skúškou geosondou HUMBOLDT H-4140

Vo viacerých výskumných prácach, napr. v [L14] sa uvádza, že metóda je vhodná pre piesčité a ílovité zeminy, pričom lepšie výsledky boli zistené na íloch. Kamenité zeminy hodnotené neboli. Z nášho výskumu vyplýva, že metódu je možné použiť na ílovitých pôdach a vyššie korelácie sú získané pri vlhkosti 15% a viac. Výrobca deklaruje vhodnosť použitia prístroja na súdržné a nesúdržné zeminy, hydraulickými spojivami stmelené podkladové vrstvy, asfaltové vrstvy a podobné materiály, pričom nie je definovaná veľkosť maximálneho zrna skúšaného materiálu. Našimi meraniami sme zistili, že metóda je vhodná aj na meranie vlastností vrstevnatých konštrukcií s použitím hrubozrnných a kamenitých materiálov. Pri meraní vlastností jemnozrnných ílovitých alebo siltovitých zemín korelačné vzťahy fungujú v rámci určitého intervalu vlhkosti a konzistencie zeminy. Veľmi nepresné výsledky boli dosiahnuté na ílovitých zeminách, kde bol povrch vrstvy vysušený v stave pevnej až tvrdej konzistencie a spodná časť vrstvy v stave tuhej alebo až mäkkej konzistencie. V takomto prípade boli výsledky meraní hrubo skreslené vlastnosťami povrchovej vrstvy a nezodpovedali realite. Po odstránení povrchovej vrstvy boli už výsledky meraní korektné. Z uvedeného vyplýva, že podobne ako pri iných metódach, aj pri tejto metóde je potrebné venovať potrebnú pozornosť príprave skúšobného miesta a overovať si všetky podmienky prostredia v ktorom sa merania vykonávajú, napríklad aj s použitím vývrtov alebo kopaných sond v skúšanej konštrukcii.

4.1.1 Prehľad experimentálnych výsledkov porovnávacích meraní normalizovaných skúšobných metód s geosondou Humboldt H-4140

V tejto časti RÚ prezentujeme výsledky experimentálnych meraní. Výsledky sú sústredené do súborov podľa materiálových modelov, ktoré reprezentujú rôzne typy bežne používaných zemných konštrukcií pri rôznych typoch stavieb. Táto metodika spracovania výsledkov skúšok umožňuje lepšiu koreláciu hodnôt ako metodika hromadného spracovania v jednom súbore, kde sa nachádza veľké množstvo dát ale bez priamej nadväznosti na zloženie konštrukcie, ktoré významne ovplyvňuje reakciu konštrukcie na zaťaženie.

Podľa STN 73 6133 je definované, že použitie nepriamych metód je podmienené preukázaním vzťahu medzi objemovou hmotnosťou vysušenej zeminy a zvoleným kontrolným parametrom pomocou koeficienta $r_{x,y} \geq 0,80$. Toto kritérium používame aj pri vyhodnocovaní jednotlivých modelov pre účely tejto práce. Pri niektorých konštrukciách neboli dosiahnuté uspokojivé výsledky z hľadiska tesnosti korelačného vzťahu, čo tiež dokazuje, že prístup korelácie podľa typu konštrukcií charakterizovaných materiálovým modelom sa ukazuje ako vhodnejšia metodika, ktorá umožňuje lepšie definovať presnosť a vhodnosť overovanej novej skúšobnej metódy.

Zoznam symbolov použitých v experimentálnej časti:

Symbol	Merná jednotka	Názov
$E_{def,1}$	(MPa, MN.m ⁻²)	modul deformácie z prvého zaťažovacieho stupňa statickej zaťažovacej skúšky
$E_{def,2}$	(MPa, MN.m ⁻²)	modul deformácie z druhého zaťažovacieho stupňa statickej zaťažovacej skúšky
E_H	(MPa, MN.m ⁻²)	modul pružnosti meraný geosondou Humboldt H-4140
k_H	(MN.m ⁻¹)	tuhosť vrstvy meraná geosondou Humboldt H-4140
E_{vd}	(MPa, MN.m ⁻²)	dynamický modul deformácie z merania dynamickou zaťažovacou skúškou LDD
vlhkosť *	(%)	interval rozsahu zistenej prirodzenej vlhkosti materiálu v konštrukcii
$\bar{y}$		aritmetický priemer hodnôt súboru
ρ_n	(kg.m ⁻³)	objemová hmotnosť vlhkej zeminy
ρ_d	(kg.m ⁻³)	objemová hmotnosť suchej zeminy
W_n	(%)	vlhkosť zeminy (prirodzená alebo získaná technologickým procesom)

MODEL 1

Porovnávacie merania medzi jednotlivými skúšobnými metódami boli vykonané na konštrukcii so zložením uvedeným v tabuľke 2, výsledky meraní sú uvedené v tabuľke 3.

Tabuľka 2 - Zloženie konštrukcie – model 1

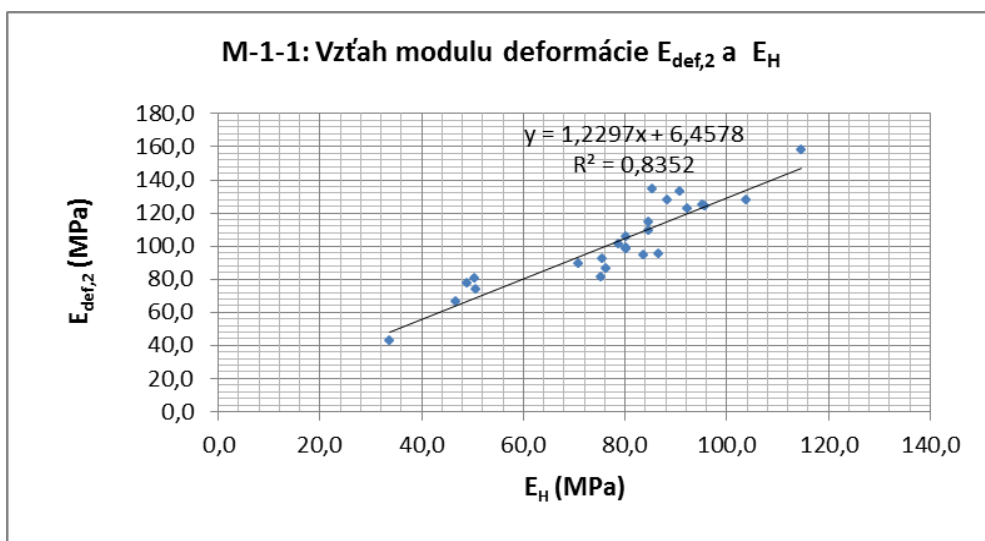
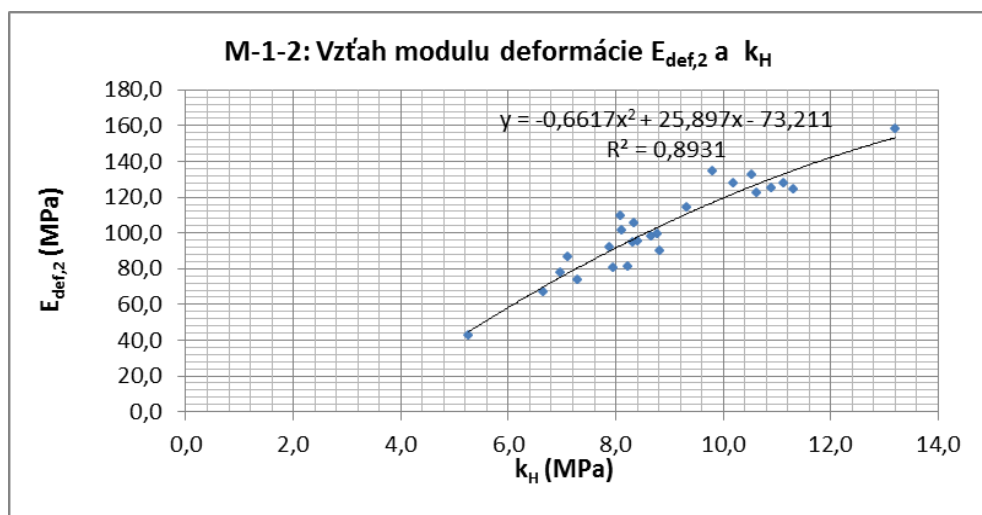
Zloženie skúšanej konštrukcie	Geotechnický typ zeminy (STN 72 1001)	Vlhkosť (%)*
štrkodrvina fr. 0/32 ... 200 mm	GW	2,1 - 6,3
štrkodrvina fr. 0/63 ... 200 mm	GW	nezistené
kamenitá sypanina fr. 0/125 ... 600 mm	GP - Cb	nezistené
podložie - íl so strednou plasticitou	CI	nezistené

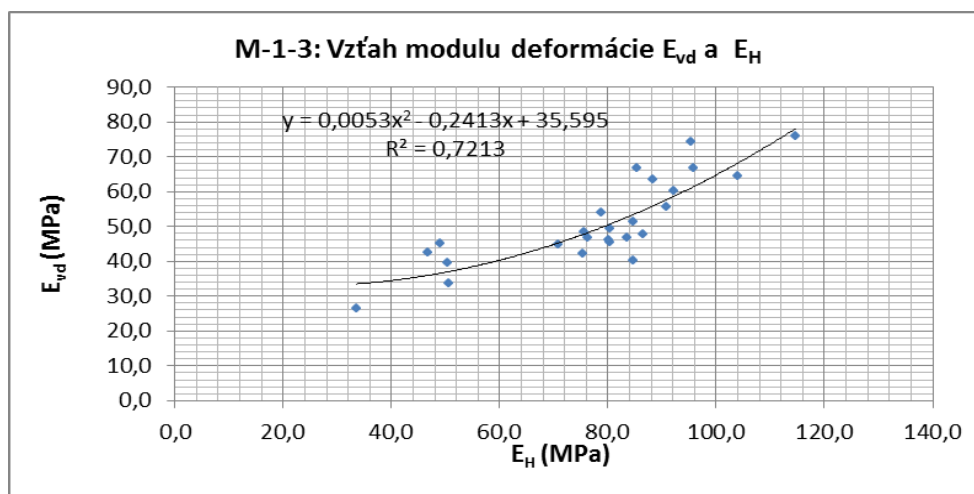
* Poznámka: Miesto merania – zdroje údajov – stavby: Letisko Sliač rekonštrukcia, Slovaktual Pravenec, Jaguar Land Rover Nitra, R 2 Mýtna – Tomášovce, Obchodné centrum Zvolen, GLS Budča, IBV Pezinok, IBV Vlčia Jama – Banská Bystrica.

Tabuľka 3 - Výsledky meraní model 1

Skúška č.	$E_{def,1}$ (MPa)	$E_{def,2}$ (MPa)	k_H (MN.m ⁻¹)	E_H (MN.m ⁻²)	E_{vd} (MN.m ⁻²)	$E_{def,2} / E_H$
1	76,9	125,2	10,9	95,3	74,3	1,31
2	61,1	128,1	11,1	103,9	64,4	1,23
3	59,8	122,3	10,6	92,2	60,3	1,33
4	65,6	134,5	9,8	85,4	66,9	1,57
5	86,8	158,2	13,2	114,6	75,9	1,38
6	62,6	128,1	10,2	88,2	63,5	1,45
7	38,6	114,2	9,33	84,6	40,2	1,35
8	38,1	66,8	6,65	46,8	42,7	1,43
9	48,9	101,5	8,11	78,8	54,1	1,29
10	48,1	105,4	8,35	80,3	49,3	1,31
11	45,7	77,5	6,98	48,9	45,2	1,58
12	39,1	92,1	7,88	75,5	48,4	1,22
13	46,4	124,5	11,30	95,8	66,8	1,30
14	45,7	74,1	7,28	50,6	33,7	1,46
15	33,8	97,9	8,65	80,3	45,6	1,22
16	54,8	94,5	8,32	83,6	46,9	1,13

17	44,9	95,6	8,41	86,6	47,8	1,10
18	45,7	109,6	8,09	84,6	51,3	1,30
19	37,0	80,6	7,95	50,3	39,6	1,60
20	51,6	132,8	10,54	90,7	55,7	1,46
21	43,6	99,2	8,78	80,1	46,2	1,24
22	40,8	81,5	8,23	75,4	42,3	1,08
23	45,6	89,7	8,81	70,9	44,8	1,27
24	24,5	42,7	5,25	33,6	26,5	1,27
25	44,8	86,8	7,10	76,3	46,8	1,14
$\bar{y}$	49,2	102,5	8,87	78,1	51,2	1,32

Obrázok 3 - Vzťah modulu deformácie $E_{\text{def},2}$ a E_H Obrázok 4 - Vzťah modulu deformácie $E_{\text{def},2}$ a k_H

Obrázok 5 - Vzťah modulu deformácie E_{vd} a E_H **Vyhodnotenie:**

Výsledky paralelných meraní preukázali dostatočnú tesnosť korelačných vzťahov medzi hodnotami $E_{def,2}$ a E_H , medzi $E_{def,2}$ a k_H , menej tesný je vzťah medzi E_{vd} a E_H . Zloženie konštrukcií z kamenitej sypaniny a štrkodrviny je typické nižšou vlhkosťou materiálu a malým rozptylom hodnôt vlhkosti materiálu. Vzhľadom na dostatočnú hrúbku vrstiev zo štrkovitých materiálov je vplyv ílovitého podložia na deformačné parametre konštrukcie zanedbateľný.

MODEL 2

Tabuľka 4 - Zloženie konštrukcie – model 2

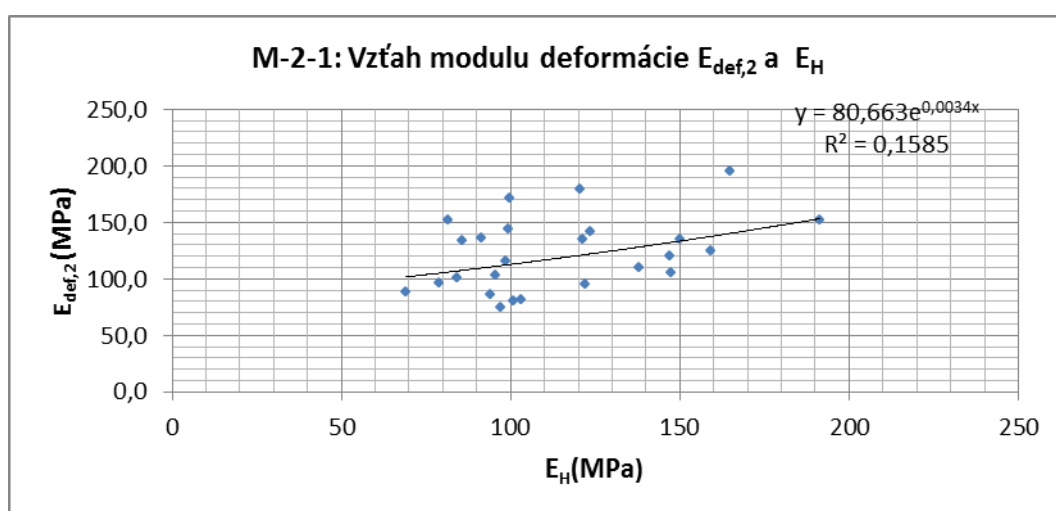
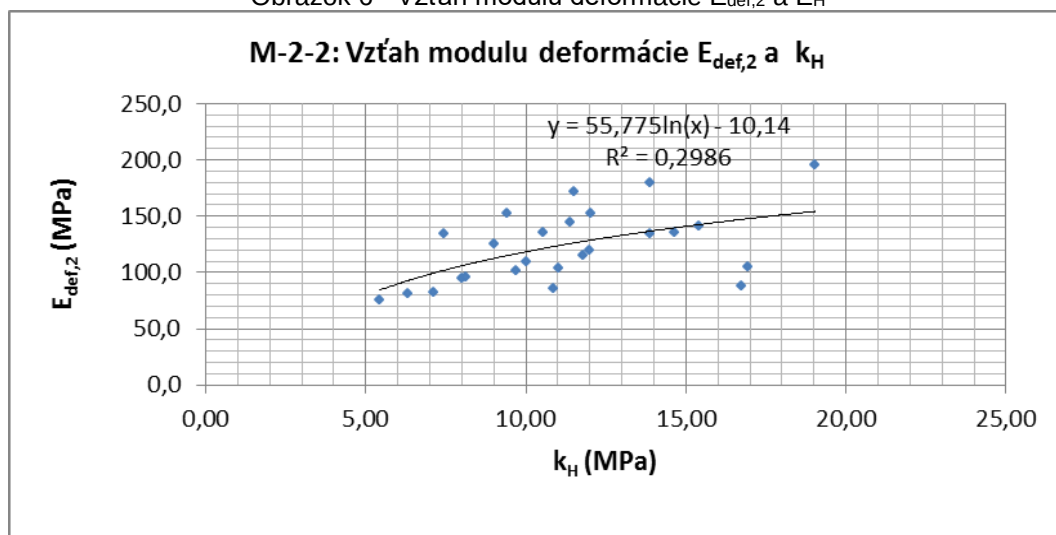
Zloženie skúšanej konštrukcie:	Geotechnický typ zeminy (STN 72 1001)	Vlhkosť (%)*
štrkodrvina fr. 0/32 ... 150 mm	GW	3,2 - 4,6
hlinito-kamenitá sypanina fr. 0/125 ... 500 mm	GM - Cb	5,6 – 10,3
podložie – silt štrkovitý	MG	nezistené

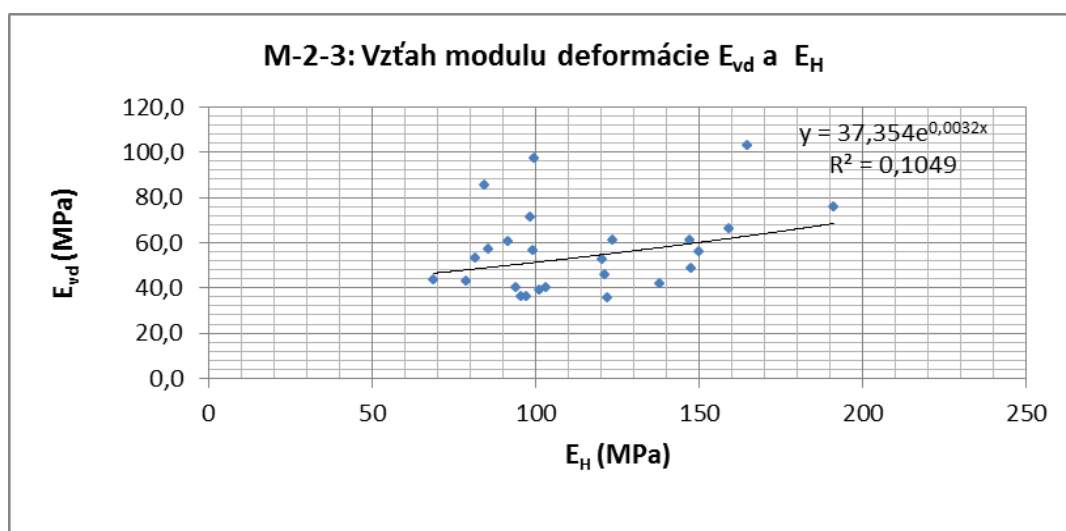
* Poznámka: Miesto merania – zdroje údajov – stavby: R1 Žarnovica-Šášovské Podhradie, Detenčné centrum Hronovce, R2 Mýtna - Tomášovce, Slovalco Žiar nad Hronom, R2 Žiar nad Hronom – obchvat

Tabuľka 5 - Výsledky meraní model 2

Skúška č.	$E_{def,1}$ (MPa)	$E_{def,2}$ (MPa)	k_H (MN.m ⁻¹)	E_H (MN.m ⁻²)	E_{vd} (MN.m ⁻²)	$E_{def,2} / E_H$
1	62,6	179,5	13,90	120,52	52,6	1,49
2	44,9	134,6	13,90	121,3	45,8	1,11
3	62,8	136	10,54	91,5	60,6	1,49
4	53,8	144	11,40	99,3	56,8	1,45
5	26,1	103,5	11,01	95,48	35,9	1,08
6	41,4	134	7,44	85,7	56,9	1,56
7	47,2	141,7	15,40	123,6	60,8	1,15
8	44,2	88,4	16,72	68,9	43,7	1,28
9	43,5	101,5	9,70	84,16	85,6	1,21
10	70,3	171,3	11,50	99,62	97,4	1,72
11	45,7	152,3	9,40	81,4	53,2	1,87
12	91,4	195,8	19,05	164,7	102,7	1,19
13	35	82	7,12	103	40,3	0,80

14	58	120	12,00	147	61,2	0,82
15	62	125	9,00	159	66,4	0,79
16	45	110	10,00	138	41,6	0,80
17	39	95	8,00	122	35,5	0,78
18	35	81	6,32	101	39,2	0,80
19	33	75	5,45	97	36,1	0,77
20	60	135	14,65	150	55,7	0,90
21	43,5	85,7	10,85	94,14	40,1	0,91
22	47,3	105,4	16,95	147,6	48,6	0,71
23	68,5	152,3	12,04	191,2	75,7	0,80
24	55,3	115,6	11,80	98,5	71,2	1,17
25	40,6	96,4	8,11	78,9	43,2	1,22
$\bar{y}$	50,2	122,4	11,29	114,5	56,27	1,11

Obrázok 6 - Vzťah modulu deformácie $E_{\text{def},2}$ a E_H Obrázok 7 - Vzťah modulu deformácie $E_{\text{def},2}$ a k_H

Obrázok 8 - Vzťah modulu deformácie E_{vd} a E_H **Vyhodnotenie:**

Výsledky paralelných meraní preukázali nedostatočnú tesnosť korelačných vzťahov medzi hodnotami $E_{def,2}$ a E_H , medzi $E_{def,2}$ a k_H aj medzi E_{vd} a E_H . Zloženie konštrukcií z hlinito-kamenitej sypaniny (HKS) a štrkodrviny je typické vysokým rozptylom hodnôt vlhkosti jemnozrnnej zložky HKS. Kolísanie vlhkosti HKS má rozhodujúci vplyv aj na mieru zhutnenia vrstevnatej konštrukcie, pričom v prípadoch niektorých meraní konštrukcia nebola ešte dostatočne zhutnená.

V prípade použitia prepočítavacieho vzťahu vypočítaného z vyššie uvedeného súboru hodnôt z tabuľky 5 z hodnoty E_H alebo k_H na hodnotu $E_{def,2}$ vzniká možnosť vzniku chyby a chybné interpretácie výsledku skúšky. Pre tieto typy konštrukcií odporúčame stanovovať korelačný vzťah na konštrukciu z rovnakého typu materiálov a rovnakých hrúbok vrstiev v rámci konkrétnej stavby, z hodnôt zistených napríklad pri zhutňovacom pokuse. V týchto prípadoch je lepšie určiť výpočtový vzťah z menšieho množstva údajov, ktorý však bude spoľahlivejší v konkrétnych podmienkach ako všeobecný vzťah získaný matematicky korektnejším spôsobom.

MODEL 3

Tabuľka 6 - Zloženie konštrukcie – model 3

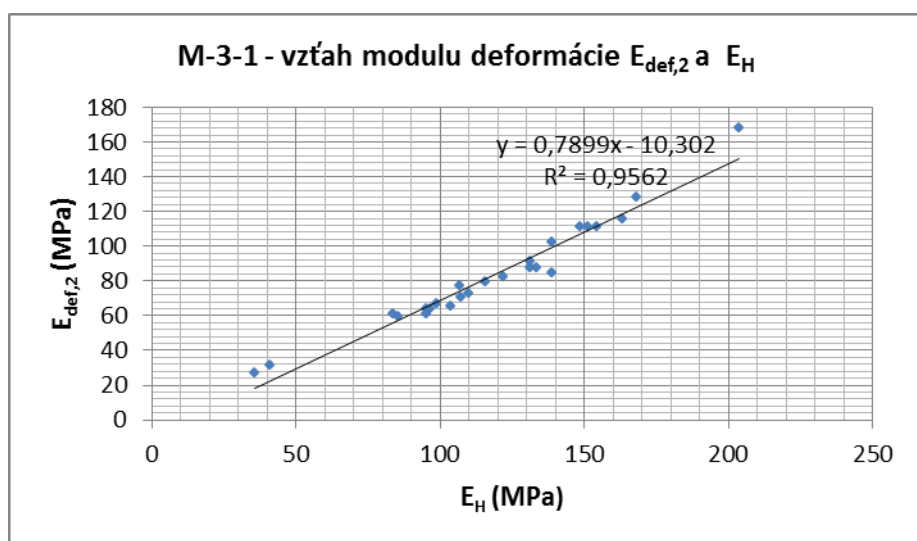
Zloženie skúšanej konštrukcie:	Geotechnický typ zeminy (STN 72 1001)	Vlhkosť (%)*
zemina stabilizovaná vápnom ... hrúbka 400 - 450 mm	CI + vápno QL90 5 – 10 dní po zhotovení	8,5 – 12,8
podložie – íly a silty prevažne tuhej konzistencie	CI – MI - CS	17,3 – 21,6

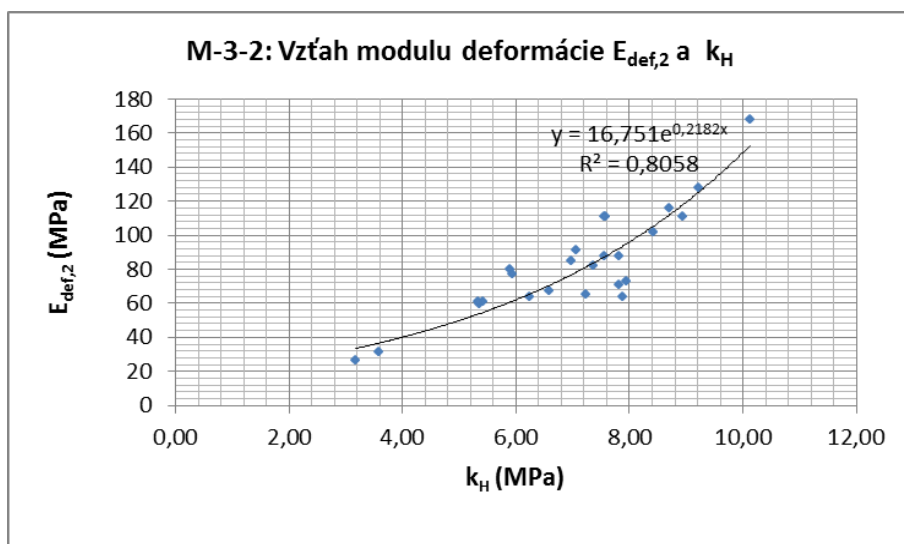
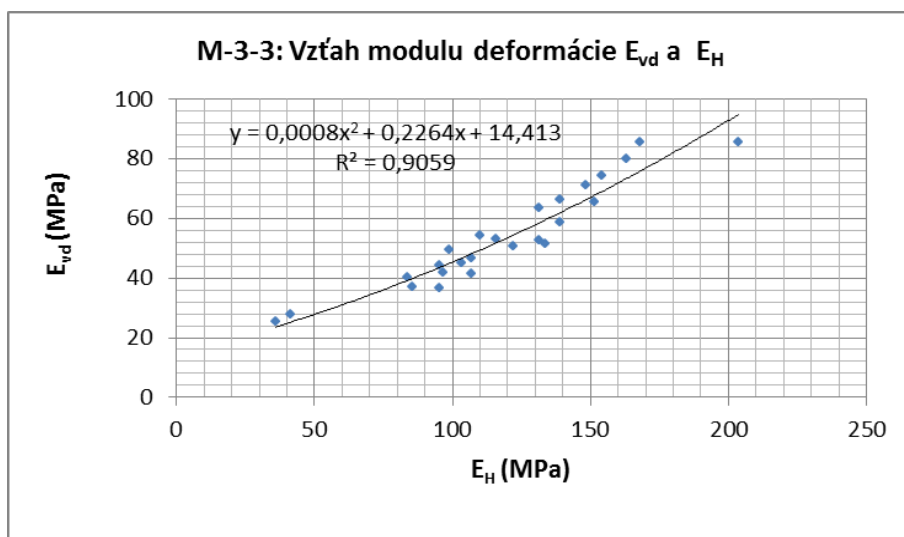
* Poznámka: Miesto merania – zdroje údajov – stavby: CONTI a ALFA CABLE Malé Bielice, Obchodné centrum Piritov, Prekladisko DPD Bratislava, Kvety Kriváň, Intercable Kriváň, LIDL Sered', Kaufland Nitra.

Tabuľka 7 - Výsledky meraní model 3

Skúška č.	$E_{def,1}$ (MPa)	$E_{def,2}$ (MPa)	k_H (MN.m ⁻¹)	E_H (MN.m ⁻²)	E_{vd} (MN.m ⁻²)	$E_{def,2} / E_H$
1	18,2	26,8	3,18	35,8	25,4	0,75
2	54,3	79,7	5,89	115,6	52,9	0,69
3	28,3	63,8	7,88	96,7	42	0,66
4	35,9	65,4	7,23	103,5	45	0,63
5	41,8	72,9	7,95	110,1	54,2	0,66
6	42,5	67,1	6,59	98,7	49,6	0,68

7	39,2	63,8	6,23	95,4	44,2	0,67
8	87,9	110,9	7,58	154,2	74,5	0,72
9	72,9	85,0	6,98	138,9	66,3	0,61
10	36,4	59,3	5,36	85,4	37,2	0,69
11	46,4	77,3	5,93	106,8	41,6	0,72
12	35,4	60,7	5,41	95,1	36,5	0,64
13	52,0	70,8	7,81	107,1	46,5	0,66
14	21,3	31,1	3,58	41,2	27,8	0,75
15	38,8	60,7	5,33	83,6	40,2	0,73
16	60,7	110,9	7,55	148,5	71,2	0,75
17	56,7	91,1	7,05	131,2	63,6	0,69
18	89,7	168,1	10,12	203,6	85,4	0,83
19	81,5	128,1	9,22	167,9	85,4	0,76
20	52,0	82,3	7,36	122,1	50,6	0,67
21	60,7	87,9	7,55	131,4	52,6	0,67
22	62,2	102,0	8,42	138,9	58,6	0,73
23	85,0	110,9	8,94	151,4	65,5	0,73
24	79,7	115,9	8,71	163,2	80,1	0,71
25	50,0	87,9	7,81	133,5	51,3	0,66
$\bar{y}$	53,2	83,2	7,03	118,4	53,9	0,70

Obrázok 9 - Vzťah modulu deformácie $E_{\text{def},2}$ a E_H

Obrázok 10 - Vzťah modulu deformácie $E_{\text{def},2}$ a k_H Obrázok 11 - Vzťah modulu deformácie E_{vd} a E_H **Vyhodnotenie:**

Výsledky paralelných meraní preukázali dostatočnú tesnosť korelačných vzťahov medzi hodnotami $E_{\text{def},2}$ a E_H , medzi $E_{\text{def},2}$ a k_H aj medzi E_{vd} a E_H . Zloženie konštrukcie je zrnitostne veľmi homogénne, rozdielna tuhosť v prípade niektorých meraní bola zapríčinená tým, že sa skúšky robili na vrstvách v rôznom čase od zhotovenia, resp. v rôznom stupni zrelosti stabilizovanej zeminy. Táto metodika merania síce zvýši rozptyl výsledkov v kontrolnom súbore ale umožní určiť citlivosť metódy vo väčšom rozsahu hodnôt a je vhodnejšia pre validáciu metódy na širšie použitie.

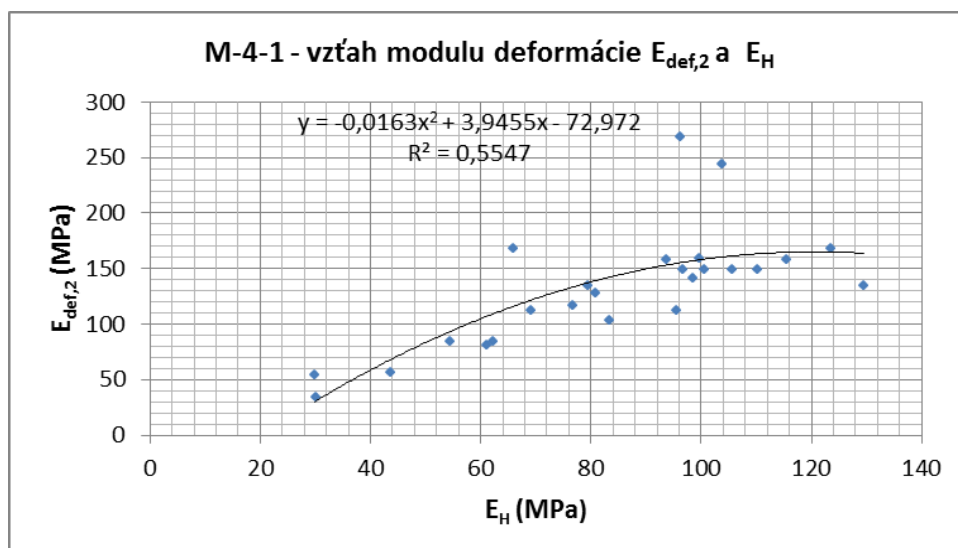
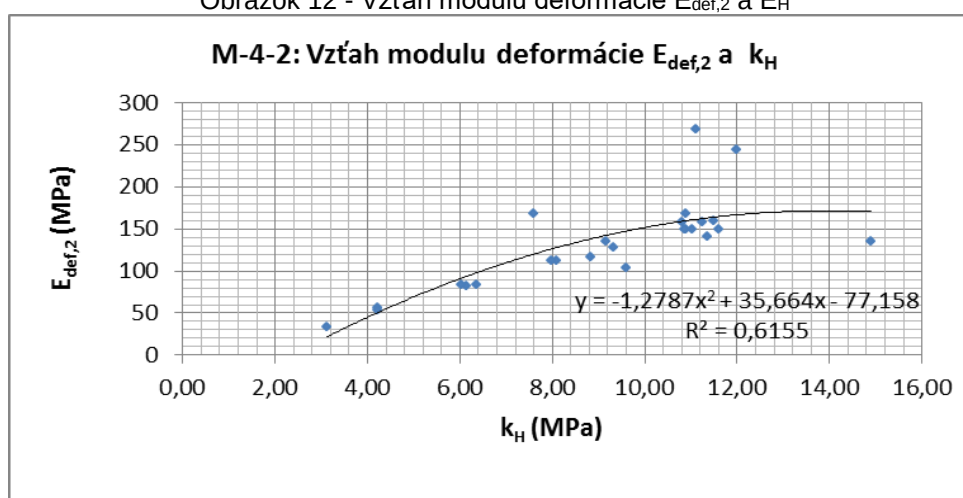
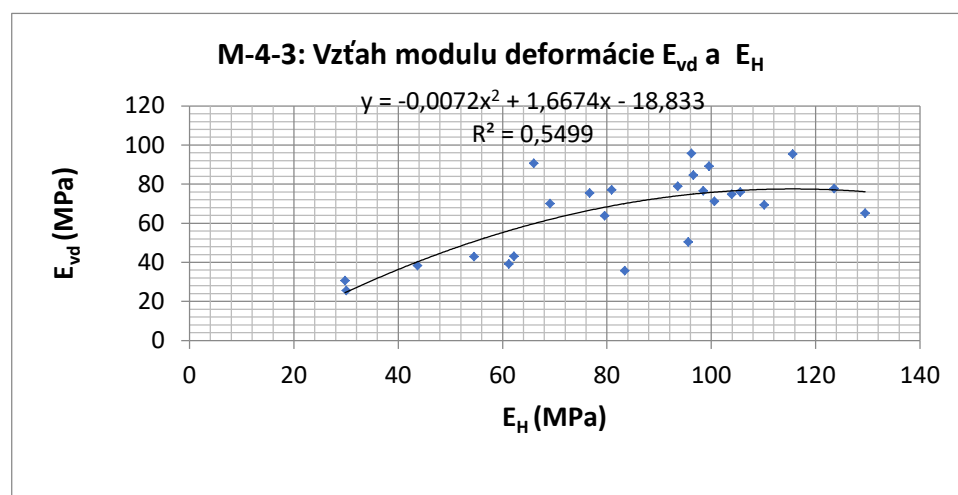
MODEL 4

Tabuľka 8 - Zloženie konštrukcie – model 4

Zloženie skúšanej konštrukcie:	Geotechnický typ zeminy (STN 72 1001)	Vlhkosť (%)*
štrkodrvina fr. 0/63 (alt. 0/32) ... 150 - 250mm	GW	3,0 - 5,5
zemina stabilizovaná vápnom ... 400 – 450 mm	CI + vápno QL90 3-10 dní po zhotovení	8,5 – 12,8
podložie – íly a silty prevažne tuhej konzistencie	CI – MI - CS	17,3 – 21,6
* Poznámka: Miesto merania – zdroje údajov – stavby: CONTI a ALFA CABLE Malé Bielice, Obchodné centrum Pířitov Nové Zámky, Prekladisko DPD Bratislava, Kvety Kriváň, LIDL Sereď, Intercable Kriváň, Fontana Dolný Kubín, GLS Budča, Kaufland Nitra.		

Tabuľka 9 - Výsledky meraní model 4

Skúška č.	E _{def,1} (MPa)	E _{def,2} (MPa)	k _H (MN.m ⁻¹)	E _H (MN.m ⁻²)	E _{vd} (MPa)	E _{def,2} / E _H
1	20,7	33,6	3,11	30,1	25,6	1,12
2	36,4	56,7	4,23	43,7	38,2	1,30
3	86,8	149,5	10,88	96,6	84,5	1,55
4	72,7	149,0	11,03	110,2	69,3	1,35
5	99,6	158,3	11,24	115,6	95,3	1,37
6	37,4	81,5	6,13	61,2	39,1	1,33
7	44,8	84,1	6,35	62,2	43,1	1,35
8	51,7	112,1	8,09	95,6	50,3	1,17
9	24,9	53,8	4,21	29,8	30,6	1,81
10	81,9	168,1	10,88	123,6	77,6	1,36
11	81,5	158,2	10,80	93,6	78,9	1,69
12	80,3	159,4	11,50	99,6	89,1	1,60
13	69,0	141,6	11,35	98,5	76,5	1,44
14	53,8	112,1	7,97	69,1	70,0	1,62
15	76,9	128,1	9,33	80,9	77,0	1,58
16	56,0	117,0	8,84	76,7	75,4	1,53
17	89,7	168,1	7,60	66,0	90,6	2,55
18	53,8	84,1	6,02	54,5	42,9	1,54
19	67,3	134,5	9,17	79,6	63,7	1,69
20	68,9	149,4	11,60	100,6	71,2	1,49
21	134,5	269,0	11,10	96,2	95,6	2,80
22	141,6	244,6	12,00	103,9	74,7	2,35
23	67,3	134,5	14,90	129,5	65,1	1,04
24	30,9	103,5	9,60	83,5	35,6	1,24
25	76,9	149,5	10,87	105,6	75,8	1,42
ȳ	68,2	132,0	9,15	84,3	65,43	1,57

Obrázok 12 - Vzťah modulu deformácie $E_{\text{def},2}$ a E_H Obrázok 13 - Vzťah modulu deformácie $E_{\text{def},2}$ a k_H Obrázok 14 - Vzťah modulu deformácie E_{vd} a E_H **Vyhodnotenie:**

Výsledky paralelných meraní preukázali nedostatočnú tesnosť korelačných vzťahov medzi hodnotami $E_{\text{def},2}$ a E_H , medzi $E_{\text{def},2}$ a k_H aj medzi E_{vd} a E_H . Zloženie skúšaných konštrukcií bolo nehomogénne z hľadiska zrnitosti zloženia, hrúbky hornej vrstvy a jej stupňa zhutnenia na relatívne tuhom podklade zo stabilizovanej zeminy. Pre tento typ konštrukcií je potrebné vykonať validáciu metódy na každú konkrétnu konštrukciu osobitne.

Zhrnutie a záverečné vyhodnotenie experimentálnych výsledkov geosondy Humboldt H-4140

Väčšina publikovaných prác riešiacich túto problematiku prezentuje výsledky meraní geosondou Humboldt H-4140 na jemnozrnných alebo strednozrnných zeminách, čo sú pomerne homogénne materiály. Cieľom tejto práce bolo preveriť použiteľnosť týchto prístrojov nielen na homogénnych materiáloch, ako sú ílovité zeminy alebo ílovité stabilizované zeminy, ale aj na vrstevnatých konštrukciách zo štrkodrviny a kamenitej sypaniny, čo je z hľadiska zrnitosti veľmi nehomogénne prostredie. Experimentálne výsledky uvedené v kapitole 2 preukazujú, že geosondou Humboldt H-4140 je možné použiť aj na vrstevnatých konštrukciách so štrkovitou (2 mm až 63 mm) až kamenitou (63 mm až 200 mm) frakciou. Zárukou správnosti merania a interpretácie výsledkov je dôkladné zostavenie korelačného vzťahu z dostatočného množstva výsledkov získaných v presne definovaných podmienkach. Tieto skutočnosti experimentálne preukážeme na jednotlivých materiálových modeloch.

Model 1 je konštrukcia z kamenitej sypaniny a štrkodrviny s vysokou deformačnou odolnosťou, kde súčiniteľ korelácie medzi výsledkami statickej zaťažovacej skúšky a geosondou Humboldt preukázal hodnoty vyššie ako 0,80 v parametri E_H aj k_H a k požadovanému kritériu sa blížila aj hodnoty korelácie E_{vd} a E_H ($r = 0,72$). Napriek určitej nehomogenite a variabilite zloženia a obsahu väčších zŕn materiálu (do priemeru 125 mm) sa preukázala vyhovujúca tesnosť korelačného vzťahu a spoľahlivosť metódy pre tento typ konštrukcie. Na pozitívne výsledky mala vplyv aj nízka a pomerne vyrovnaná vlhkosť materiálu konštrukcie v prípade jednotlivých meraní.

Model 2 je konštrukcia z hlinito-kamenitej sypaniny charakteru štrku siltovitého a tenkej vrstvy štrkodrviny fr. 0/32. Výsledky paralelných meraní preukázali nedostatočnú tesnosť korelačných vzťahov medzi hodnotami $E_{def,2}$ a E_H , medzi $E_{def,2}$ a k_H aj medzi E_{vd} a E_H (koeficient korelácie menší ako 0,3 resp. 0,2). Zloženie konštrukcií z hlinito-kamenitej sypaniny (HKS) a štrkodrviny je typické vysokým rozptylom hodnôt vlhkosti jemnozrnej zložky HKS. Pre tieto typy konštrukcií odporúčam stanovovať korelačný vzťah na konštrukciu z rovnakého typu materiálov a rovnakých hrúbok vrstiev v rámci konkrétnej stavby, z hodnôt zistených napríklad pri zhutňovanom pokuse. V týchto prípadoch je lepšie určiť výpočtový vzťah z menšieho množstva údajov, ktorý však bude spoľahlivejší v konkrétnych podmienkach ako všeobecný vzťah získaný matematicky korektnejším spôsobom.

Model 3 je konštrukcia pozostávajúca z vrstvy ílovitej zeminy stabilizovanej vápnom uložená na vrstve rovnakej zeminy v prirodzenom uložení. Výsledky paralelných meraní preukázali dostatočnú tesnosť korelačných vzťahov medzi hodnotami $E_{def,2}$ a E_H , medzi $E_{def,2}$ a k_H aj medzi E_{vd} a E_H . Zloženie konštrukcie je zrnitostne veľmi homogénne, rozdielna tuhosť v prípade niektorých meraní bola zapríčinená tým, že sa skúšky robili na vrstvách v rôznom čase od zhotovenia, resp. v rôznom stupni zrelosti stabilizovanej zeminy. Táto metodika merania síce zvýši rozptyl výsledkov v kontrolnom súbore ale umožní určiť citlivosť metódy vo väčšom rozsahu hodnôt a je vhodnejšia pre validáciu metódy na širšie použitie.

Model 4 je konštrukcia pozostávajúca z vrstvy štrkodrviny uložená na vrstve ílovitej zeminy stabilizovanej vápnom. Výsledky meraní preukázali nedostatočnú tesnosť korelačných vzťahov medzi hodnotami $E_{def,2}$ a E_H , medzi $E_{def,2}$ a k_H aj medzi E_{vd} a E_H . Zloženie skúšaných konštrukcií bolo nehomogénne z hľadiska zrnitostného zloženia, hrúbky hornej vrstvy štrkodrviny a jej stupňa zhutnenia na relatívne tuhom podklade zo stabilizovanej zeminy. Pre tento typ konštrukcií je potrebné vykonať validáciu metódy na každú konkrétnu konštrukciu osobitne.

Model 5 (uvedený v kapitole 4.3) je konštrukcia zo zhutnenej ílovitej zeminy, na ktorej boli vykonané skúšky miery zhutnenia priamou metódou vyrezávacím valcom a paralelne elektronickým hutnomerom Humboldt H-4114C. Korelácia hodnôt elektronického hutnomera s výsledkami priameho merania objemovej hmotnosti a vlhkosti metódou vyrezávacieho valca má výbornú tesnosť výsledkov porovnávaných súborov. Je to spôsobené aj tým, že samotný elektronický hutnomer je pred meraním potrebné interne kalibrovať na súbore 5 až 6 meraní na výsledkoch získaných priamou metódou. Korelácia hodnôt geosondy H-4140 s výsledkami priameho merania a vypočítanej suchej objemovej hmotnosti dosiahla neuspokojivé výsledky. O niečo lepšie hodnoty korelačného súčiniteľa boli dosiahnuté pri porovnávaní vlhkej objemovej hmotnosti a modulu pružnosti. Je to spôsobené tým, že dynamické metódy sú citlivejšie na obsah vody v skúšanom materiáli, čo spôsobuje veľký rozptyl výsledkov.

4.2 Cleggovo kladivo CIST

Prístroj Cleggovo kladivo resp. CIST (Cleggov nárazový prístroj) na skúšanie zeminy je dynamické zariadenie podobné prístroju LDD (ľahká dynamická doska). Na rozdiel od LDD používa menší priemer kruhovej dosky a menšiu hmotnosť dopadajúceho závažia. Prístroj bol vyvinutý v roku 1976 Dr. Badenom Cleggom v Austrálii a pôvodne bol určený na testovanie odrazovej tvrdosti plôch pre rôzne športy (kriket, baseball, jazdectvo, tenis a podobne). Pre rôzne účely použitia sa používajú kladivá s hmotnosťou 2,25 kg, 4,5 kg, 10 kg a 20 kg (obrázok 15). Prístroje vyrába spoločnosť Lafayette Instruments Company, Sagamore, USA. Výška pádu kladiva je štandardne 450 mm. Pre tento skúšobný prístroj boli robené viaceré korelačné merania s inými metódami, napr. radiačný hutnomer, kužeľový penetrometer, statická zaťažovacia skúška a podobne. Konštruktér prístroja publikoval aj korelačný vzťah s metódou CBR [L21] :

$$\text{CBR} = [0.24 (\text{IV}) + 1]^2 \quad (1)$$

kde IV je hodnota zaznamenananej nárazovej sily z prístroja Clegg (Clegg Hammer Impact Value)

Bola publikovaná aj korelácia medzi pevnosťou v tlaku zeminy stabilizovanej cementom (ZSC) a hodnotou IV nasledovne:

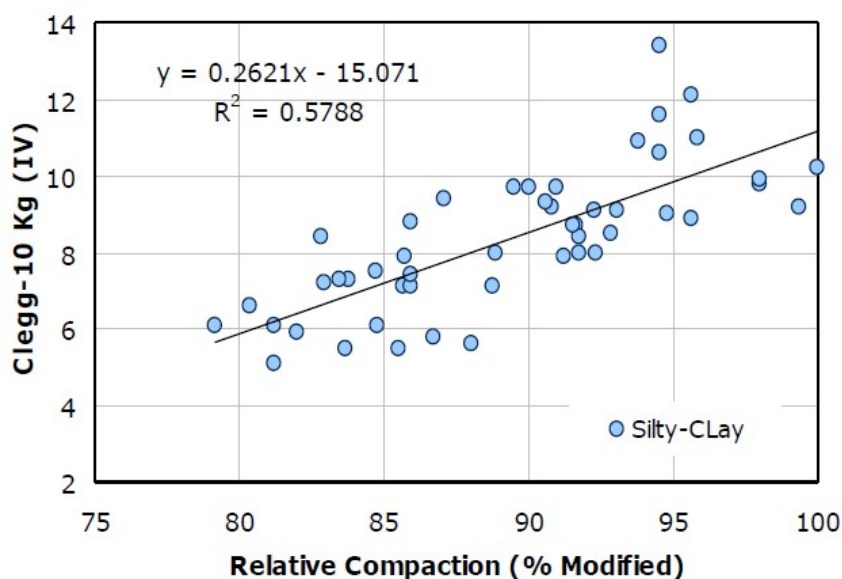
$$\text{Log } f_c = 0.08087 + 1.3094 \text{ Log } (\text{IV}) \quad (2)$$

kde f_c je pevnosť v tlaku ZSC a IV je hodnota zaznamenananej nárazovej sily z prístroja Clegg



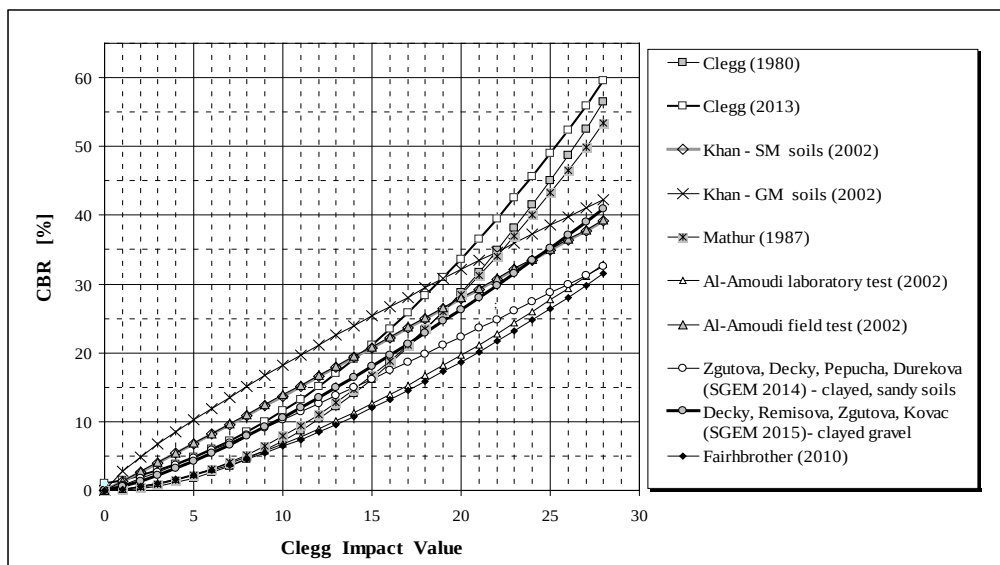
Obrázok 15 - Cleggovo kladivo 10 kg s transportným zariadením

Podľa viacerých štúdií je prístroj určený predovšetkým pre jemnozrnné zeminy, ale boli urobené korelácie aj pre drobné a stredné štrkovité materiály a zmesi jemnozrnných a hrubozrnných zemín. Ako aj pri iných dynamických metódach aj v prípade Clegga je dôležité meranie aktuálnej vlhkosti skúšanej zeminy a pre presnosť korelácie je dôležité presne definovať interval vlhkosti zeminy. V [L21] sa uvádza niekoľko korelácií na rôznych typoch zemín od pieskov po piesčité íly, kde sa korelačné súčinitele pohybujú v rozsahu od 0,40 do 0,67, čo nie je dostatočné pre presnejšie merania vo výrobo-kontrolnom procese.



Obrázok 16 - Korelácia hodnôt z Cleggovho kladiva a hodnôt koeficientu miery zhutnenia D v %, meraného radiačným hutnomerom Troxler [L21]

Na obrázku 17 je prezentovaný podrobný grafický prehľad korelácií hodnôt CBR od hodnôt CIV (Clegg Impact value).



Obrázok 17 – Komparácia korelácií hodnôt CBR od hodnôt CIV (Clegg Impact value) pre rôzne druhy zemín [L9]

V našich podmienkach by bolo perspektívne využitie tohto prístroja v prípade, že by jeho cena bola výrazne nižšia ako je cena zariadení LDD, ktoré majú na rozdiel od Clegga výrazne väčší rozsah použitia pre strednozrnné a hrubozrnné zeminy.

4.3 Elektrická metóda merania miery zhutnenia

Priekopníkom tejto metódy je spoločnosť Humboldt, ktorá už dlhšiu dobu dodáva na trh elektrický hutnomer H-4114C, ktorý je schopný v jednom meracom cykle merať hodnotu objemovej vlhkosti a vlhkosti zeminy. Meranie je rýchle a v priebehu niekoľkých minút sú k dispozícii výsledky meraných hodnôt aj vypočítané hodnoty miery zhutnenia, pokiaľ sú do pamäte prístroja vložené všetky relevantné údaje o zhutniteľnosti zeminy. Nevýhodou prístroja v porovnaní napr. s radiačným hutnomerom, je potreba väčšieho počtu porovnávacích meraní s inou, napr. priamou metódou a vytvorenie korelačnej závislosti, podľa ktorej potom prístroj pri meraní v reálnych podmienkach na

tom istom materiáli, prepočítava namerané elektrické veličiny na hodnoty objemovej hmotnosti a vlhkosti. Presnosť merania pri kontrolných skúškach je priamo závislá od presnosti nastaveného korelačného vzťahu. Prístroj má v základnom predajnom nastavení bohatú výbavu všetkých potrebných pomôcok a softvéru pre spracovanie údajov na osobnom počítači.



Obrázok 18 - Meranie miery zhutnenia zeminy elektrickým hutnomerom Humboldt H-4114C

Prístroj je prioritne určený na meranie objemovej hmotnosti a vlhkosti jemnozrnných zemín (íly, silty, piesky), dobré výsledky sa dajú dosiahnuť aj na zeminových zmesiach typu piesok ílovitý, íl štrkovitý, silt piesčitý alebo silt štrkovitý. Meranie je prakticky možné v každom materiáli, do ktorého sa dajú zaraziť meracie hroty a hrot vlhkomera a v ktorom je možné merať objemovú hmotnosť a vlhkosť aj inou, najlepšie priamou metódou. Ako už bolo vyššie uvedené, prístroj treba pred prvým meraním na určitom type zeminy v danej lokalite kalibrovať pomocou porovnávacích meraní, pričom vstupné hodnoty musia reprezentovať dostatočný rozsah hodnôt objemovej hmotnosti a vlhkosti, t.j. od prakticky kyprej nezhutnenej zeminy, cez mierne zhutnenú až po maximálne zhutnenú a podobne vlhkosť od suchej zeminy až po úplne nasýtenú zeminu. Takýto proces je potrebné urobiť priamo v teréne, najlepšie v konkrétnej lokalite, čo je časovo aj organizačne dosť náročné. Robili sme aj experimenty so vzorkami a kalibráciou v laboratóriu, ale prístroj pravdepodobne z dôvodu potrebného uzemnenia a prepojenia s terénom nefunguje vo formách alebo nádobách. Najviac sa nám osvedčila metóda kalibrácie počas zhutňovacieho pokusu, pri postupnom zhutňovaní zeminy, pričom parametre zhutnenia boli merané vyrezávacími valcami alebo objemomerom, vlhkosť rýchlou karbidovou alebo elektrickou metódou dodatočne korigovanou podľa vlhkosti stanovenej sušením v laboratóriu. Mobilné laboratórium musí byť vybavené tak, aby priamo v teréne bolo schopné presne odvážiť a upraviť vzorky zemín a vyhodnotiť nielen objemovú vlhkosť za mokra ale podľa zistenej vlhkosti stanoviť aj suchú objemovú hmotnosť zeminy. Takto sa dal nazbierať dostatočný rozsah údajov na kalibráciu elektrického hutnomera, ktorý bol už počas ďalšej výstavby použiteľný na rutinné merania s dostatočnou spoľahlivosťou až kým nedošlo k zmene typu zeminy, kedy je potrebné celý proces kalibrácie znovu opakovať.

4.3.1 Prehľad experimentálnych výsledkov porovnávacích meraní normalizovaných skúšobných metód s elektrickým hutnomerom Humboldt H-4114C

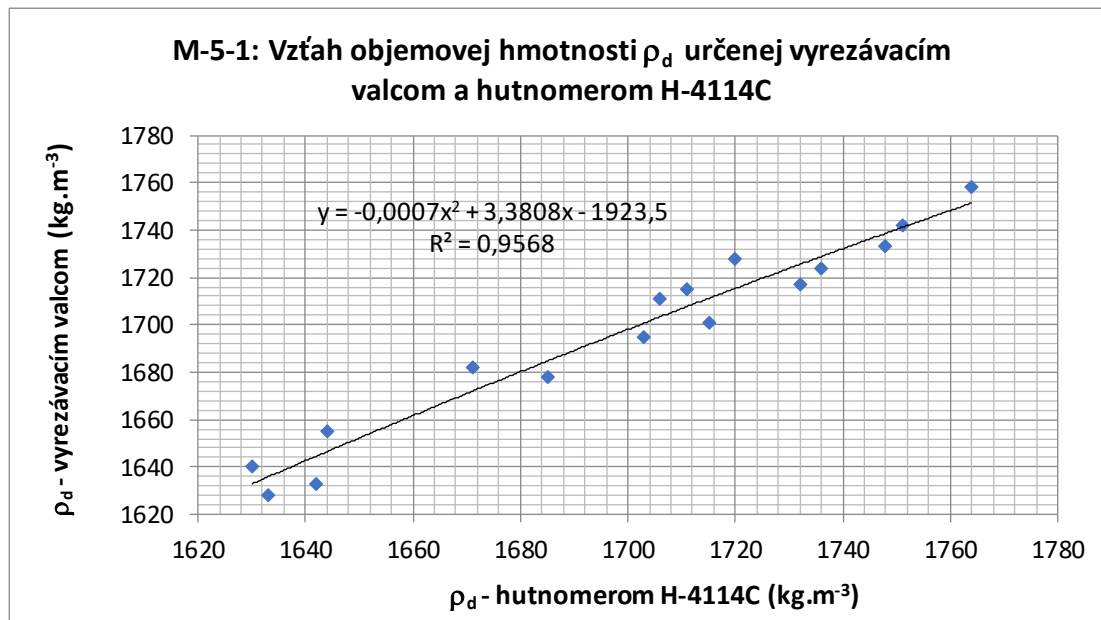
MODEL 5

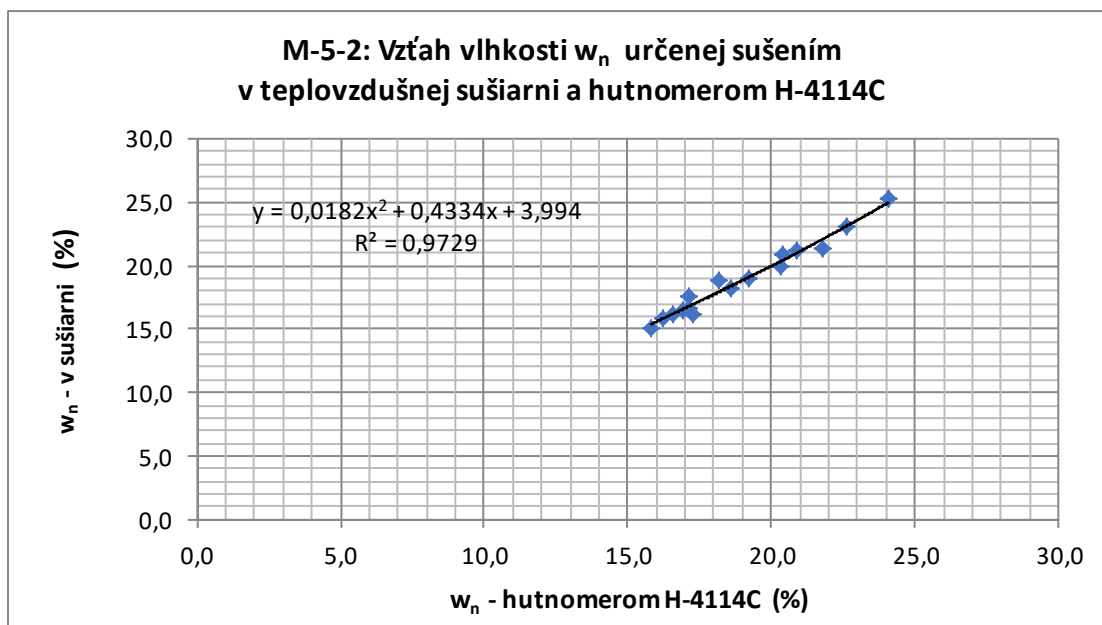
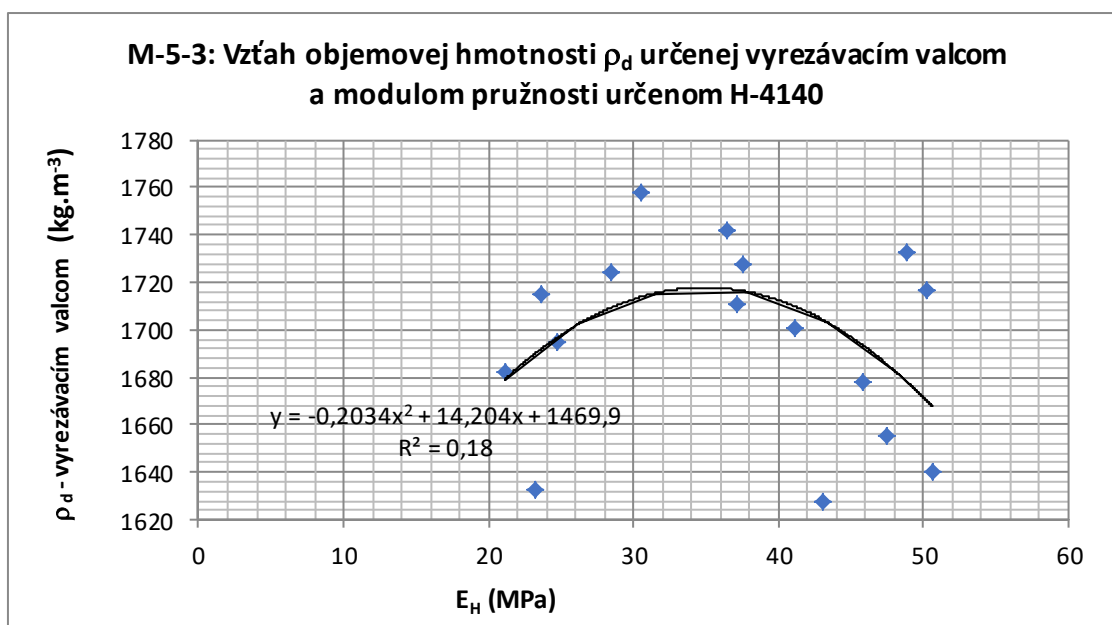
Tabuľka 10 - Zloženie konštrukcie – model 5

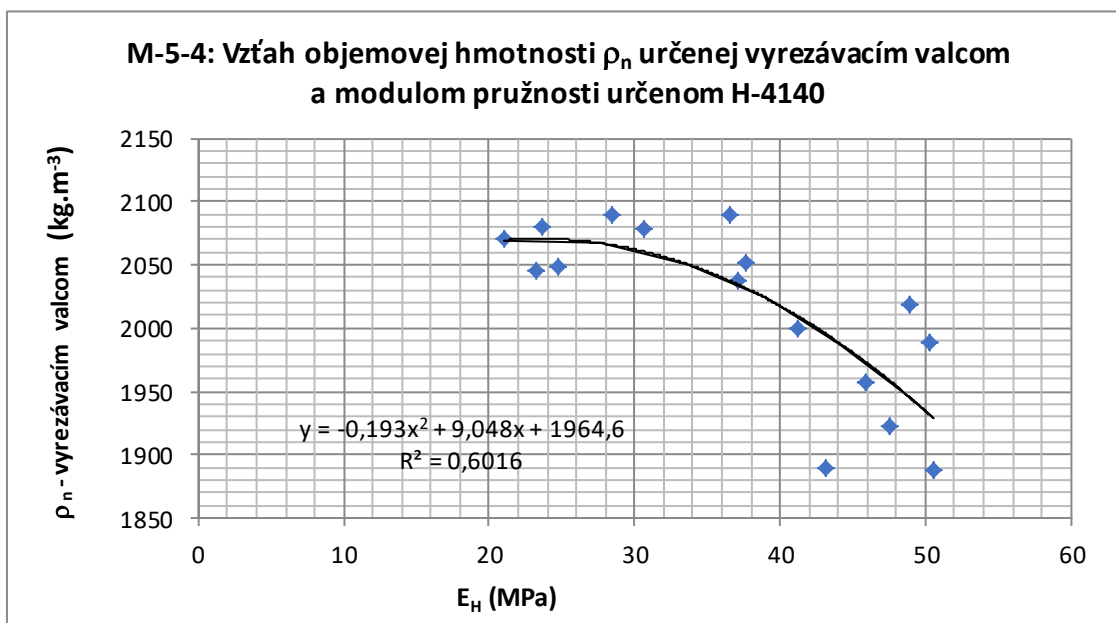
Zloženie skúšanej konštrukcie:	Geotechnický typ zeminy (STN 72 1001)	Vlhkosť (%)*
íl so strednou plasticitou, tuhá konzistencia	CI ($w_n \leq w_{opt}$)	11,5 - 16,8
podložie - íl so strednou plasticitou, tuhá až mäkká konzistencia	CI ($w_n \leq w_{opt}$)	14,5 – 21,5
* Poznámka: Miesto merania – zdroje údajov – stavby: SKO (skládka odpadov) Zvolenská Slatina, Vodná nádrž Ládovo, SKO Tornaľa, SKO Bzenica, SKO Kostolné.		

Tabuľka 11 - Výsledky meraní model 5

	Skúška vyrezávacím valcom			Skúška hutnomerom Humboldt 4114C			Skúška H-4140	
Skúška číslo:	ρ_n (kgm ⁻³)	w_n (%)	ρ_d (kgm ⁻³)	ρ_n (kgm ⁻³)	w_n (%)	ρ_d (kgm ⁻³)	k_H (MN.m ⁻¹)	E_H (MN.m ⁻²)
1	1957	16,6	1678	1973	17,1	1685	7,11	45,9
2	2037	19,0	1711	2034	19,2	1706	5,23	37,1
3	1988	15,8	1717	2013	16,2	1732	7,84	50,3
4	2089	19,9	1742	2106	20,3	1751	5,11	36,5
5	2052	18,8	1728	2033	18,2	1720	5,43	37,6
6	2090	21,2	1724	2099	20,9	1736	4,68	28,5
7	2078	18,2	1758	2 092	18,6	1764	4,96	30,6
8	2046	25,3	1633	2 038	24,1	1642	3,22	23,2
9	2071	23,1	1682	2 049	22,6	1671	3,11	21,1
10	2080	21,3	1715	2 084	21,8	1711	3,41	23,7
5	2048	20,8	1695	2 050	20,4	1703	3,65	24,8
6	1890	16,1	1628	1 916	17,3	1633	7,21	43,1
7	1888	15,1	1640	1 888	15,8	1630	8,20	50,6
8	1923	16,2	1655	1 917	16,6	1644	7,95	47,5
9	2000	17,6	1701	2 008	17,1	1715	6,87	41,2
10	2019	16,5	1733	2 043	16,9	1748	6,93	48,9
$\bar{y}$	2016	18,8	1696	2021	18,9	1699	5,68	36,9

Obrázok 19 - Vzťah objemovej hmotnosti ρ_d vyrezávacím valcom a hutnomerom H-4114C

Obrázok 20 - Vzťah vlhkosti w_n určenej sušením v teplovzdušnej sušiarni a hutnomerom H-4114CObrázok 21 - Vzťah objemovej hmotnosti ρ_d určenej vyrezávacím valcom a modulom pružnosti určenom H-4140



Obrázok 22 - Vzťah objemovej hmotnosti ρ_n určenej vyrezávacím valcom a modulom pružnosti určenom H-4140

Vyhodnotenie:

Korelácia hodnôt elektronického hutnomera s výsledkami priameho merania objemovej hmotnosti a vlhkosti metódou vyrezávacieho valca má výbornú tesnosť výsledkov porovnávaných súborov. Je to spôsobené aj tým, že samotný elektronický hutnomer je pred meraním potrebné interne kalibrovať na súbore 5 až 6 meraní na výsledkoch získaných priamou metódou. Korelácia hodnôt geosondy H-4140 s výsledkami priameho merania a vypočítanej suchej objemovej hmotnosti dosiahla neuspokojivé výsledky. O niečo lepšie hodnoty korelačného súčiniteľa boli dosiahnuté pri porovnávaní vlhkej objemovej hmotnosti a modulu pružnosti. Je to spôsobené tým, že dynamické metódy sú citlivejšie na obsah vody v skúšanom materiáli, čo spôsobuje veľký rozptyl výsledkov.



Obrázok 23 - Určovanie objemovej hmotnosti zeminy metódou vyrezávacieho valca na stavbe Vodná nádrž Ľadovo, Lučenec



Obrázok 24 - Určovanie objemovej hmotnosti a vlhkosti zeminy elektronickým hutnomerom Humboldt H-4114C, Vodná nádrž L'adovo, Lučenec

Experimentálne merania publikované v tejto RÚ preukázali, že metódy merania prístrojmi Humboldt H-4140 a H-4114C sú uspokojivo validovateľné a použiteľné v praxi, čo bolo preukázané aj vo viacerých publikáciách uvedených v zozname literatúry.

4.4 Penetračné metódy

Pri kontrole kvality zhutnenia zemín a sypanín sa na rozdiel od inžinierskogeologického prieskumu, kde sú preferované zariadenia na statickú a dynamickú penetráciu s hlbším dosahom (niekoľko metrov až desiatok metrov), používajú ľahké ručné zariadenia s dosahom do 1,5 m, ktoré sú využiteľné na rýchle overenie vlastností povrchovej časti alebo jednotlivých vrstiev zemnej konštrukcie. Na statickú penetráciu sa používajú rôzne typy statických penetrometrov s kužeľovým hrotom alebo tzv. Proctorove ihly s valcovým hrotom. Meranou veličinou je prevažne sila pri ručnom zatlačaní, ktorá sa zisťuje priamo dynamometrom alebo cez meradlo posunu (odchýlkomer) s výpočtom sily alebo penetračného odporu z rôznych nomogramov alebo priloženého softvéru dodaného výrobcom. Použiteľnosť takto získaných hodnôt závisí od presnosti stanovenia korelačných závislostí z rôznymi charakteristikami kontrolovaných zemín, napr. objemovej hmotnosti, vlhkosti, šmykovej pevnosti, súčiniteľa zhutnenia a podobne. Statické penetračné metódy sú vhodné do jemnozrnných zemín. V štrkovitých zeminách sa používajú dynamické penetračné metódy označované aj ľahká dynamická penetrácia. Skúšobné zariadenia používajú princíp zarážania pohyblivým závažím a meranou hodnotou je spravidla počet úderov potrebných na zarazenie dĺžkovej jednotky (dielika) skúšobnej tyče do skúšanej konštrukcie. Podľa počtu úderov potrebných na zarazenie tyče sa odvodzuje penetračný odpor alebo pomocou korelácie s inými meracími metódami aj údaje o miere zhutnenia, relatívnej uľahnutosti alebo deformačných charakteristikách skúšaného materiálu. Ľahká statická a dynamická penetrácia sa používa spravidla na informatívne alebo orientačné merania, napr. na vyhľadávanie menej kvalitných miest alebo vrstiev v konštrukcii a podobne. Väčšie rozšírenie a uplatnenie týchto metód v kontrole kvality zemných konštrukcií a podkladových vrstiev vozoviek, limituje aj nedostatočné pokrytie týchto metód v sústave slovenských technických noriem. Korelačnými meraniami je overené meranie ľahkou dynamickou penetráciou aj na štrkovitých materiáloch do veľkosti zrna 50 mm. Pri obsahu väčších zŕn sú výsledky skreslené a prístroj sa môže poškodiť napr. v dôsledku odlomenia kužeľového hrotu alebo ohnutia zarážacej tyče.



Obrázok 25 - Kontrola kvality vrstvy minerálneho tesnenia skládky odpadu radiačným hutnomerom (starší, už nevyrábaný model) v kombinácii s ručnou statickou penetráciou (Proctorova ihla)



Obrázok 26 - Použitie ľahkého dynamického penetrometra na overenie vlastností podlažia priemyselnej podlahy v kombinácii s ľahkou dynamickou doskou pri stavebno-technickom prieskume konštrukcie

Technicky špičkovú úroveň v oblasti ľahkej dynamickej penetrácie dosahuje prístroj PANDA od spoločnosti Sol Solution. Ide o metódu označovanú ako DCP, v preklade dynamická kužeľová penetrácia, ktorá je principiálne rovnaká ako sa používa pri ručných dynamických penetrometroch, ale prístroj je vybavený záznamovým a vyhodnocovacím zariadením, prenosom nameraných dát do cloudu a niektoré verzie aj automatizovaným zarážacím zariadením. Tento typ prístrojov posúva ľahkú dynamickú penetráciu na úroveň porovnateľnú s inými zavedenými „normovými“ metódami a bolo by vhodné implementovať túto metódu aj do našich noriem. Vo Francúzsku sa používa v súlade s normou NF P 94-105.



Obrázok 27 - Dynamický kužeľový penetrometer PANDA

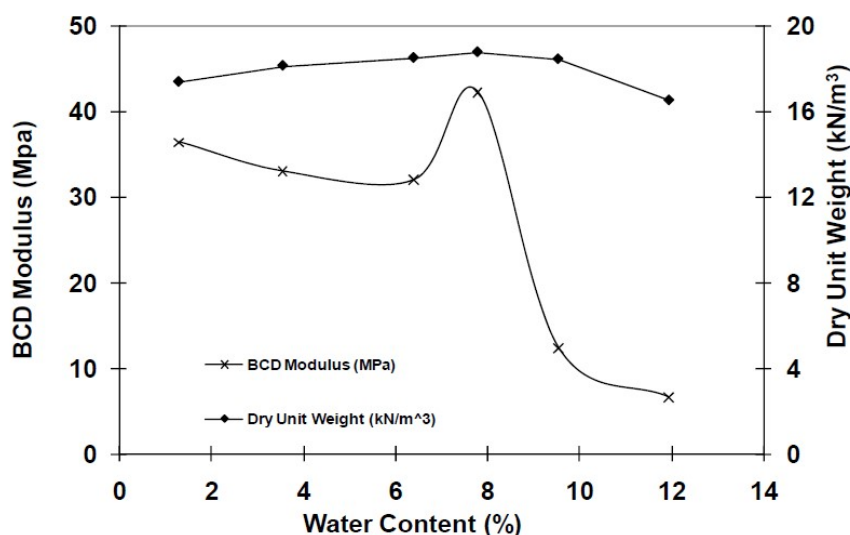
4.5 Metóda BCD

Metóda BCD je metóda merania s prístrojom BCD (Briaud Compaction Device) nazvaným podľa jeho konštruktéra. V princípe ide o dynamickú metódu podobnú už vyššie uvedeným zariadeniam typu LDD alebo Clegg ale s využitím nízkeho kontaktného napätia. Prístroj používa na prenos kontaktného dynamického napätia do povrchu konštrukcie kruhovú pružnú dosku priemeru 150 mm umiestnenú na spodnom konci meracej tyče. Operátor sa opiera o rukoväť na hornom konci tyče, doska sa ohýba, napätie v ohybe je okamžite merané tenzometrami na spodnej doske. Pri zaťažovaní sa používa nízke zaťaženie len 223 N. Ohyb dosky reaguje na tuhosť podložia a pomocou prevodníka elektrického signálu a procesora meria tzv. BCD modul, ktorý je možné korelovať z deformačnými charakteristikami iných typov skúšok alebo hodnotami miery zhutnenia z priamych meraní.



Obrázok 28 - Meranie zhutnenia zariadením BCD-4

Prístroj je možné kalibrovať v laboratóriu na gumených blokoch a vzhľadom na rozmer zaťažovacej dosky je možné aj vykonávať merania na vzorkách vo valcoch priemeru nad 150 mm počas Proctorovej skúšky alebo skúšky relatívnej uľahnutosti a nastaviť tak prístroj na konkrétny typ zeminy a jej parametre zhutnenia, čo bolo overené v [L3].



Obrázok 29 - Vzťah hodnôt BCD modulu, objemovej hmotnosti a vlhkosti [L3]

4.6 Dynamická kontinuálna metóda – metóda CCC

Dynamické kontinuálne, alebo plynulé metódy kontroly zhutnenia využívajú pre kontrolu priebehu zhutňovania zemnej konštrukcie meracie zariadenie, ktoré je súčasťou novších typov vibračných valcov. Vo výrobnej praxi sa označuje termínom kompaktoomer alebo kompakto-meter. Metóda je definovaná v STN 73 6133 a podrobnejšie ju popisuje predbežná norma STN P CEN/TS 17006 ako plynulú kontrolu zhutnenia, v skratke PKZ resp. CCC podľa anglického názvu metódy nasledovne [L26] :

PKZ vykonávaná valcom so zabudovaným systémom je založená na dynamickej interakcii medzi kmitaním behúňa vibračného valca a zeminou alebo sypaninou, ktorá je zhutňovaná. Dynamicky merané hodnoty vyvolané činnosťou behúňa valca by mali byť jednoznačne fyzikálne definované. Vibračné valce majú behúňom, ktorý je vybavený jedným alebo viacerými excentrami rotujúcimi stálou rýchlosťou. Valce pre PKZ sú vybavené akceleračnými snímačmi, procesormi a zobrazovacou jednotkou, ktoré umožňujú zaznamenať interakciu medzi behúňom a zeminou. Počas pohybu valca s vibráciou prebieha plynulá výmena kinetickej energie medzi behúňom valca a vibrovaným zeminovým systémom. Oboje, tuhosť zeminy a absorpcia vibrácie valca sa menia s narastajúcim zhutnením. Z analýzy priebehu vibrácie môžu byť odvodené parametre kvality zhutnenia.

Norma definuje hlavné vplyvy na merané hodnoty PKZ:

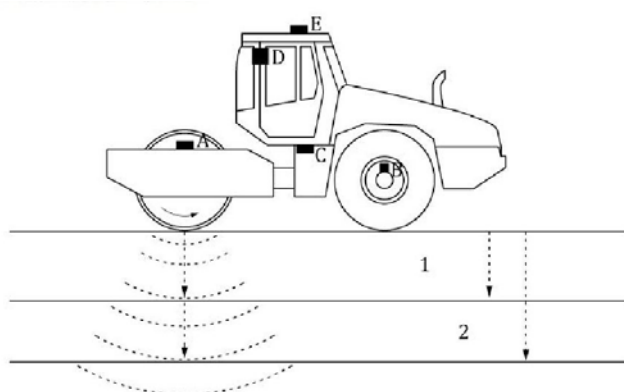
- typ valca (vibračný jednobehúňový, tandemový alebo inteligentný),
- statické lineárne zaťaženie behúňa valca,
- amplitúda vibrácie,
- frekvencia vibrácie,
- pracovná rýchlosť pohybu,
- smer pohybu (vpred alebo vzad),
- typ materiálu,
- vlhkosť materiálu,
- rovinatosť povrchu vrstvy,
- homogenita vrstvy,
- doba zhutňovania a prestávky v zhutňovaní.

Norma dôrazne rozlišuje pojmy ako hĺbka zhutňovania (vzdialenosť od povrchu vrstvy, v ktorej sa ešte prejavuje výrazný zhutňovací efekt) a hĺbka merania (vzdialenosť od povrchu vrstvy, z ktorej sa získava dynamická odozva vrstiev podložia, ktoré utlmujú vibrácie). Hĺbka merania je spravidla väčšia ako hĺbka zhutňovania. Hĺbka merania sa zvyšuje so zvyšovaním hmotnosti valca, statického

lineárneho zaťaženia a je spravidla vyššia pri použití vyššej amplitúdy vibrácie. Hĺbku merania najvýraznejšie ovplyvňuje typ zhutňovanej zeminy, jej vlhkosť, kvalita vrstiev podložia zhutňovanej zeminy a kvalita povrchu meranej vrstvy. V priebehu merania pri plynulej kontrole zhutnenia je potrebné splniť podmienky:

- budiaca frekvencia by mala byť konštantná v rozsahu $\Delta f < 2$ Hz,
- amplitúda by mala byť konštantná v rozsahu $\Delta a < 0,1$ mm,
- pracovná rýchlosť by mala byť konštantná v rozsahu $\Delta v < 1$ km/hod.

Takto definované podmienky umožňujú definovať vibračný valec so systémom PKZ ako skúšobné zariadenie a kalibrovat' ho ako merací systém podľa metrologických pravidiel. Takýmto spôsobom sa valec ako technologické zariadenie stáva plnohodnotným skúšobným zariadením pre vykonávanie kontrolných alebo preberacích skúšok kvality konštrukcie a vykonané meranie vyhovuje podmienkam opakovateľnosti a reprodukovateľnosti.



Vysvetlivky:

1 – hĺbka zhutňovania

2 – hĺbka merania

A- akceleračný snímač

B- merač vzdialenosti (prejdenej dráhy)

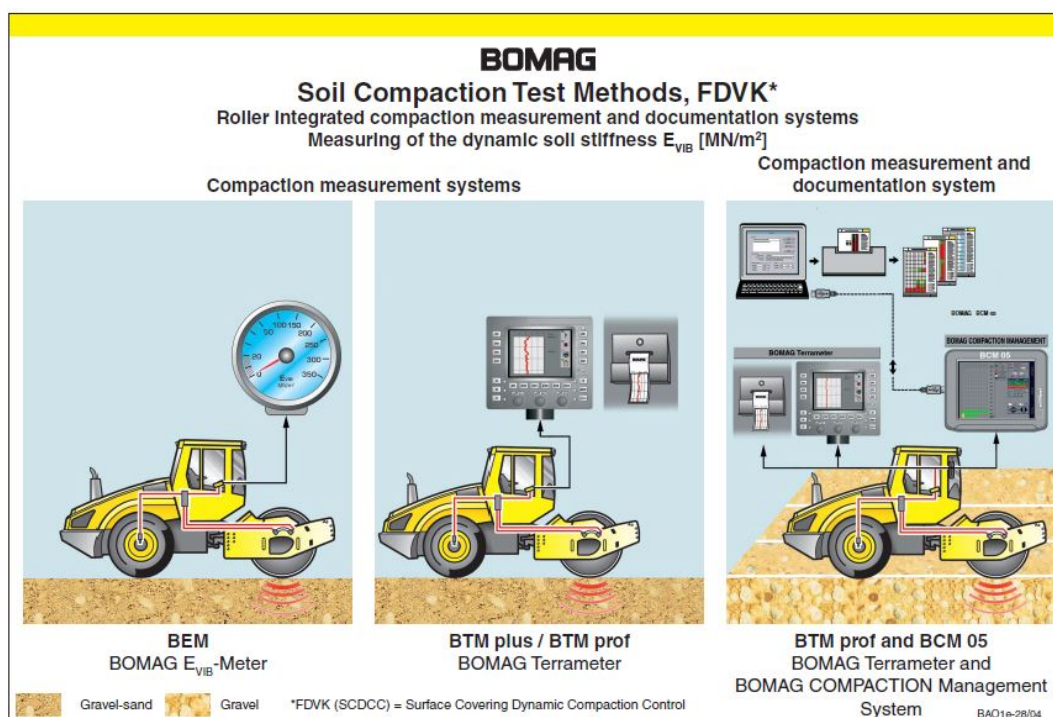
C- procesor (vyhodnocovacia jednotka)

D- zobrazovač a záznamník

E- polohovací systém (GNSS anténa)

Obrázok 30 - Valec so systémom PKZ a definícia základných pojmov

Dynamická metóda CCC nachádza vo výrobnej praxi čoraz väčšie uplatnenie, nielen ako súčasť správneho technologického postupu zhutňovania, ale aj ako oficiálna kontrolná a validovaná metóda s vysokou mierou korelovateľnosti výsledkov s „normovými“ metódami, čo je popísané vo viacerých publikáciách [L2, L3, L15, L18, L22, L26, L34].



Obrázok 31 - Prehľad systémov CCC od spoločnosti Bomag [L2]

4.7 Návrhy na validáciu a implementáciu nenormalizovaných metód v kontrolno-skúšobnej praxi

Prehľad metód validácie a implementácie novej skúšobnej metódy:

- 1) Porovnaním výsledkov novej metódy so zavedenou normalizovanou metódou
- 2) Riadeným experimentom napr. podľa noriem radu STN ISO 5725
- 3) Prevzatím zavedenej skúšobnej metódy zo zahraničnej normy, technického predpisu alebo odbornej literatúry

Metodika validácie novej skúšobnej metódy vzájomných porovnaním a matematickým hodnotením paralelných meraní novej a už zavedenej a overenej skúšobnej metódy, je často používanou a niekedy aj jedinou možnou metódou, ako preukázať vhodnosť novej metódy pre praktické použitie. Používa ju mnoho autorov vo výskumnej činnosti aj praktickej aplikácii [L1, L3, L14, L15, L17, L19, L20, L21, L23, L27, L29] a jej výsledky sa už publikujú aj ako súčasť európskych alebo národných technických noriem (obrázok 32). Táto metodika je široko využívaná aj v metrológii pri kalibrácii a overovaní meradiel, kde sa pomocou série kontrolných meraní porovnávajú výsledky kontrolovaného meradla s iným štandardizovaným meradlom alebo etalónom. Pre účely tejto práce boli použité výsledky paralelných statických zaťažovacích skúšok, dynamických zaťažovacích skúšok a geosondy Humboldt H-4140. Merania boli vykonávané výhradne na reálnych zemných konštrukciách počas kontrolných skúšok hotových konštrukcií a v priebehu zhutňovania konštrukcií napr. počas zhutňovacieho pokusu, ktoré umožňujú rozšíriť rozsah korelovaných hodnôt aj o nižšie hodnoty získané z ešte nedokončenej, resp. nedohutnenej konštrukcie. Porovnávaním výsledkov na reálnych zemných konštrukciách sa tento prístup odlišuje od prístupu iných autorov [L14, L17, L21], ktorí získavali väčšinu údajov na skúšobných poliach menšieho rozsahu alebo v homogénnom prostredí jemnozrnných a piesčitých zemín, kde je jednoduchšie dosiahnuť vysokú homogenitu hodnoteného súboru výsledkov. Pre účely tejto práce boli použité výsledky statických zaťažovacích skúšok vykonávaných podľa STN 73 6190, zaťažovacou doskou priemeru 357 mm (postup A3 podľa tabuľky A1 prílohy A). Dynamické zaťažovacie skúšky boli vykonávané skúšobným zariadením LDD 100 (výrobca ECM Brno, Česká republika), ktoré používa zaťažovaciu dosku priemeru 300 mm. Skúšky boli vykonávané podľa návodu výrobcu, ktorý je v súlade s požiadavkami STN 73 6192 a STN 73 6133. K týmto dvom vyššie uvedeným „normovým“ metódam boli paralelne vykonávané merania geosondou Humboldt H-4140 s cieľom získať dostatok paralelných meraní pre určenie korelácie a spoľahlivých údajov potrebných pre validáciu tejto „nenormovej metódy“. Prevažná väčšina výsledkov paralelných porovnávacích meraní bola získaná spôsobom, že pri jednej statickej zaťažovacej skúške, boli okolo miesta skúšky urobené tri samostatné merania ľahkou dynamickou doskou aj geosondou Humboldt a tie boli vyhodnotené tak, že do porovnávacjej databázy sa dostal výsledok aritmetického priemeru z troch skúšok LDD a Humboldta. Tento postup umožní čiastočne eliminovať lokálne materiálové nehomogenity.

Metodika validácie porovnávaním sa dá použiť pre rôzne skúšobné metódy aj v prípade, že vzájomne porovnávané metódy sú založené na rôznych fyzikálnych princípoch. Príklad možných validačných aplikácií je uvedený v tabuľke 12.

Tabuľka 12 - Príklady možných validácií nenormalizovaných a normalizovaných skúšobných metód

Nenormalizovaná metóda	Normalizovaná metóda	Norma	Porovnávané a korelované parametre
Elektronický hutnomer Geosonda Humboldt H-4140 Proctorova ihla DCP Panda Metóda BCD Metóda Clegg	Metóda vyrezávacieho krúžku (valca)	STN 72 1010	Objemová hmotnosť a vlhkosť zeminy
Elektronický hutnomer Geosonda Humboldt H-4140 Proctorova ihla DCP Panda Metóda BCD Metóda Clegg	Jamková metóda	STN 72 1010	Objemová hmotnosť a vlhkosť zeminy
Elektronický hutnomer Geosonda Humboldt H-4140 Proctorova ihla DCP Panda Metóda BCD Metóda Clegg	Rádiometrická metóda	STN 72 1010 STN 73 1375 STN 73 6133	Objemová hmotnosť a vlhkosť zeminy
Geosonda Humboldt H-4140	Geodetická metóda	STN 73 6133	Priemerná hodnota stlačenia vrstvy, pomer stlačenia vrstvy k celkovej hrúbke vrstvy
Elektronický hutnomer Geosonda Humboldt H-4140 Proctorova ihla DCP Panda Metóda BCD Metóda Clegg	Statická zaťažovacia skúška doskou	STN 73 6190	Moduly deformácie, modul pružnosti, modul reakcie, prieťahy povrchu vrstvy
Elektronický hutnomer Geosonda Humboldt H-4140 Proctorova ihla DCP Panda Metóda BCD Metóda Clegg	Dynamická zaťažovacia skúška ľahkou dynamickou doskou	STN 73 6192	Dynamický modul deformácie
Elektronický hutnomer Geosonda Humboldt H-4140 Proctorova ihla DCP Panda Metóda BCD Metóda Clegg	Dynamická kontrola zhutňovania kompakťmerom (plynulá kontrola zhutnenia, metóda CCC)*	STN 73 6133 STN P CEN/TS 17006	Bezrozmerná veličina (BMV) alebo dynamický modul deformácie

Z tabuľky 12 vyplýva, že je možné pre každú nenormalizovanú metódu robiť viac typov porovnávacích meraní a korelácií. Základnou podmienkou správnosti a použiteľnosti získaných prepočítavacích vzťahov je korektné nastavenie okrajových podmienok, predovšetkým z hľadiska

materiálového zloženia skúšanej konštrukcie (rozmer zŕn, zrnitosť zloženie, vlhkosť a ostatné fyzikálno-chemické vlastnosti). Pre dosiahnutie presnejších výsledkov je vhodná aj kombinácia viac ako dvoch skúšobných metód, napr. elektronický hutnomer – jamková metóda – rádiometrická metóda alebo geosonda Humboldt – statická zaťažovacia skúška – dynamická zaťažovacia skúška a podobne.

Druh zeminy (značka)	D % PS	I _p 1	E _{def,2} MPa	M _{vd} MPa
GW	≥ 100	≥ 0,85	≥ 100	≥ 50
	≥ 98	≥ 0,80	≥ 80	≥ 40
	≥ 97	≥ 0,75	≥ 70	≥ 35
GP, SW, SP	≥ 100	≥ 0,90	≥ 80	≥ 40
	≥ 98	≥ 0,85	≥ 70	≥ 35
	≥ 97	≥ 0,85	≥ 60	≥ 32
	≥ 95	≥ 0,80	≥ 45	≥ 30
GM, GC, G-F, S-F, SM, SC	≥ 100	-	≥ 45	≥ 30
	≥ 97	-	≥ 30	≥ 20
	≥ 95	-	≥ 20	≥ 15
Jemnozrnné zeminy triedy MG, CG, MS, CS ^a	≥ 100	-	≥ 35	≥ 30
	≥ 97	-	≥ 30	≥ 20
	≥ 95	-	≥ 20	≥ 15
	≥ 92	-	≥ 15	≥ 15
Jemnozrnné zeminy triedy CL, CI, CH, CE, ML, MI, MH, ME	≥ 100	-	≥ 25	≥ 20
	≥ 97	-	≥ 20	≥ 17
	≥ 95	-	≥ 15	≥ 15
	≥ 92	-	≥ 10	≥ 12

^a Uvedené koeficienty platia pre odchýlky skutočnej vlhkosti od vlhkosti optimálnej w_{opt} v intervaloch:
- Pre zeminy s I_p < 17 (-3; +2) %
- Pre zeminy s I_p ≥ 17 (-5; +3) %

Obrázok 32 - Ukážka prevodového vzťahu medzi hodnotami modulov zo statickej a dynamickej zaťažovacej skúšky, ako ich uvádza [ZP2]

4.8 Korelácie modulov deformácie zo statickej a dynamickej zaťažovacej skúšky

V tejto kapitole RÚ uvádzame príklady validácie metódy dynamickej zaťažovacej skúšky, ktorá bola zavedená do sústavy slovenských technických noriem aj do niektorých zahraničných noriem ako nová metóda, pričom jej validácia prebiehala v praxi metódou porovnania výsledkov so statickou zaťažovacou skúškou. V nemeckej, českej a slovenskej literatúre boli v období 1990 až 2010 uvádzané korelačné závislosti medzi hodnotami dynamického modulu deformácie E_{vd} meraného zariadením LDD 100 a hodnotami $E_{def,2}$ vyhodnocovanými zo statickej zaťažovacej skúšky (SZS) predovšetkým prezentované v nasledujúcom tvare:

$$E_{def,2} = k_{SZS/LDD100} \cdot E_{vd} \quad (3)$$

V tabuľke 13 je uvedený prehľad rozsahov hodnôt koeficientu $k_{SZS/LDD100}$, uvádzaných rôznymi autormi v rokoch 1990 až 2010.

Vo vedeckom príspevku z r. 2011 [L10] autori prvý krát prezentovali korelačné závislosti (KZ):

- modulu deformácie z druhého zaťažovacieho cyklu $E_{def,2}$ od modulu pružnosti E_2 (obrázok 33) vyhodnotených z meraní SZS podľa STN 73 6190 kompatibilných s angloamerickými postupmi,
- modulu deformácie $E_{def,2}$ od dynamického modulu deformácie E_{vd} (obrázok 34) meraných postupu STN 73 6192 zariadením LDD 100.

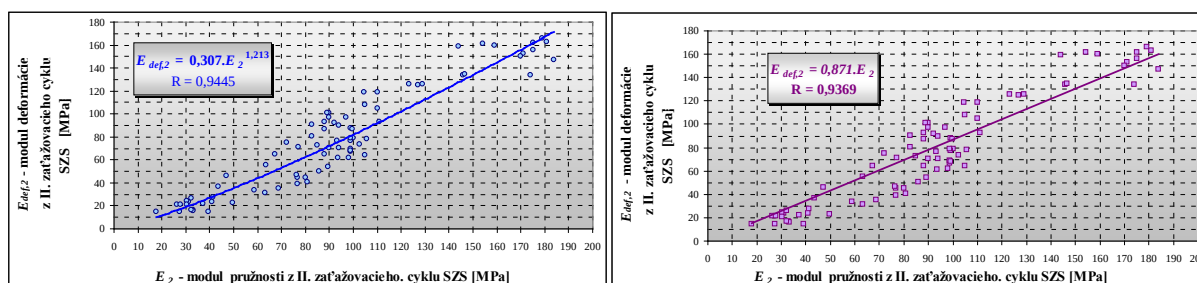
Tabuľka 13 - Korelačný koeficient statickej a dynamickej zaťažovacej skúšky z obdobia 1995 až 2010

Autor	$k_{SZS/LDD100}$	Typ hutnenej vrstvy	Autor	$k_{SZS/LDD100}$	Typ hutnenej vrstvy
SRN	1,3 - 1,5	ílovité a hlinité zeminy	Putirka	2,0	štrkopiesok Kotešová 0/125
	1,8 - 2,0	piesky, hlinité štrky		2,4	štrkodrvina Varín 0/63
	2,1 - 2,3	štrky s dobrou zrnitosťou		2,2	štrkodrvina Jablonoňové 0/63
Starší	1,3	hliny*	Zedník CDV Brno	0,65	íly
	2,0 - 3,0	hlinito-kamenité sypaniny*		0,70	sprašovitité zeminy
	3,0 - 4,0	kamenité sypaniny, ťažené štrky		0,90	piesčité íl, hlina piesčitá

Kopriva	1,8 - 2,2	dunajské štrky		0,95	ílovitý a hlinitý štrk
	2,3 - 2,7	vážske štrky		1,00	piesok ílovitý
Decký	0,5 - 0,7	íl s vysokou plasticitou	Zgútová	1,05	piesok
	0,8 - 1,2	íl s strednou plasticitou		1,20	štrk s prímiesou jemn. zeminy
	1,3	íl s nízkou plasticitou		1,60	betónový recyklát 0/63
	1,8	CL + štrk zle zrnéný GP		1,70	štrky
	2,0	CL + GP + zahlinená výsievka		2,0	hlinité zeminy*
Putirka	2,0	štrkopiesok Kotešová 0/125		2,4	hlinito-kamenité sypaniny*
	2,4	štrkodrvina Varín 0/63		2,4	štrky s dobrou zrnitosťou
	2,2	štrkodrvina Jabložné 0/63		2,1	Štrkodrvina (4.vrstva násypu)

* V zmysle aktuálne platnej terminológie pomenovanie "hliny, hlinitý štrk, hlinité zeminy" je nahradené názvami - silty, siltovité štrky, siltovité zeminy.

Tieto mechanické charakteristiky podložia a nestmelených konštrukčných vrstiev vozoviek sú rozhodujúcimi charakteristikami kontroly kvality zhutnenia týchto vrstiev. Na obrázku 33 je prezentovaná korelačná závislosť modulu deformácie $E_{def,2}$ určenej SZS podľa STN 73 6190 od návrhovej hodnoty modulu pružnosti podložia vozoviek a nestmelených ochranných, resp. podkladových konštrukčných vrstiev vozoviek PK. V rámci výskumu autorov bolo zistené, že modul pružnosti týchto konštrukčných vrstiev PK je prakticky identický pre 1. aj 2. zaťažovací cyklus SZS a je ekvipolentný s návrhovou hodnotou modulu pružnosti určeného z výsledkov skúšky CBR.



Obrázok 33 - Mocninová a lineárna závislosť modulu deformácie z druhého zaťažovacieho cyklu $E_{def,2}$ od hodnoty modulu pružnosti podložia E_p PK]

$$E_{def,2} = 0,307 \cdot E_{p,n}^{1,213} \quad (4)$$

$$E_{def,2} = 0,871 \cdot E_{p,n} \quad (5)$$

Z uvedených rovníc si vyjadríme prepočet E_{def} na návrhovú hodnotu modulu pružnosti podložia $E_{p,n}$ podľa nasledujúcich vzťahov.

$$E_{p,n} = (E_{def,2} / 0,307)^{\left(\frac{1}{1,213}\right)} = 2,65 \cdot E_{def,2}^{0,82} \quad (6)$$

$$E_{p,n} = (E_{def,2} / 0,871) = 1,15 \cdot E_{def,2} \quad (7)$$

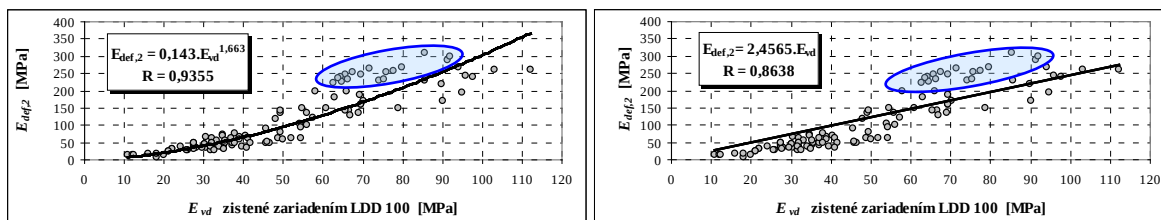
V tabuľke 14 sú prezentované prepočítané hodnoty návrhových hodnôt modulu pružnosti na odpovedajúce návrhovej hodnote modulu pružnosti $E_{p,n}$. Autori na základe svojich dlhoročných skúseností v predmetnej problematike vychádzali z premisy ekvipolencie hodnôt $E_{p,n}$ s hodnotami modulu pružnosti vyhodnoteného z 2. cyklu SZS doskou $E_{def,2}$.

Tabuľka 14 - Prepočítané požadované hodnoty podkladu nestmelennej vrstvy vozoviek podľa [T7]

Nestmelená vrstva		Požadované hodnoty mechanických charakteristík podložia vozoviek [MPa]			
Onačenie	TDZ	$E_{def,2}$	Podklad	Mocninový prepočet $E_{def,2}$ $E_{p,n}$ podľa	Lineárny prepočet $E_{def,2}$ na $E_{p,n}$
UM MSK	I.-III.	120	UM ŠD	134	138
UM ŠD	I.-III.	90	konštrukčná plášť	106	104
UM ŠD	IV.-VI.	70	UM ŠD $C_{Deklarovaná}$	86	81
UM ŠD	IV.-VI.	50	konštrukčná plášť	66	58

UM - nestmelená zmes (angl. Unbound Mixture), UM MSK - nestmelená zmes z mechanicky spevneného kameniva, UM ŠD - nestmelená zmes zo štrkodrviny, UM ŠD $C_{Deklarovaná}$ - štrkopiesok

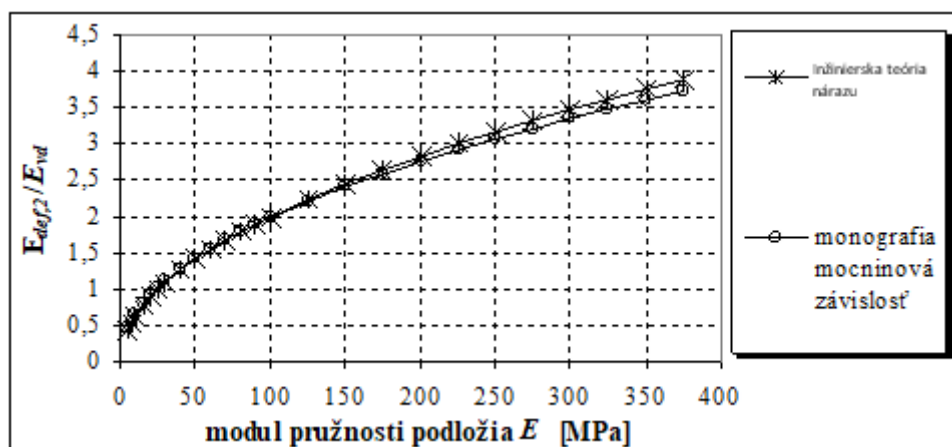
Z tabuľky 14 vyplýva, že pri navrhovaní a výstavbe nestmelených konštrukcií vozoviek PK v zmysle kodifikovaných ustanovení cestného zákona č. 135/1961 Zb. [12] a technických podmienok TP 033 by mali byť uvažované moduly pružnosti odpovedajúce požadovaným hodnotám $E_{def,2}$.



Obrázok 34 - Mocninová a lineárna závislosť modulu deformácie z druhého zaťažovacieho cyklu $E_{def,2}$ od dynamického (rázového) modulu deformácie meraného zariadením LDD 100 [L11]

Hodnoty zvýraznené na obrázku 34 modrou elipsou predstavujú závislosti z nedostatočne zhutnenej tunelovej rúbaniny použitej ako ochranná vrstva vozovky v tuneli, pri ktorých sa pomery $E_{def,2}/E_{def,1}$ pohybovali v rozsahu do 2,9 do 4,5.

Analýzou dosiahnutých výsledkov a s využitím rovníc 1 až 9 bolo zistené, že koeficient $k_{SZS/LDD100}$ nadobúda hodnotu 1,0 pre hodnotu modulu deformácie $E_{def,2} = 25$ MPa. Z uvedeného je zrejmé, že pre túto hodnotu budú rovnaké deformačné charakteristiky zistené SZS a zariadením LDD 100 pre výšku pádu 0,75 m, čo je konštantná hodnota používaná v technickej praxi. Na základe prezentovaného možno konštatovať, že zariadenie LDD 100 generuje kontaktný tlak 0,1 MPa pod doskou práve pre hodnotu $E = 25$ MPa. Na obrázku 35 je prezentovaná komparácia hodnôt $k_{SZS/LDD100} = E_{def,2}/E_{vd}$ zistených v rámci výskumných aktivít SvF UNIZA, označená ako *monografia – mocninová závislosť* s teoretickými hodnotami zistenými podľa inžinierskej teórie nárazu. Hodnoty $k_{SZS/LDD100}$ v prípade inžinierskej teórie nárazu boli určené podľa nasledujúceho vzťahu

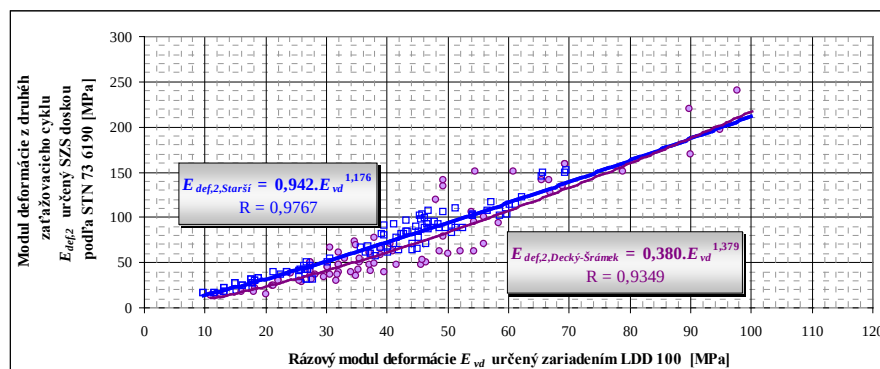


Obrázok 35 - Komparácia hodnôt SZS/LDD100 zistených v rámci výskumu autorov a inžinierskej teórie nárazu

$$k_{SZS/LDD100} = k_{E_{def,2}/E_{vd}} = \frac{P_{\max, E_i}}{P_{\max, E=25 \text{ MPa}}} \quad (8)$$

kde: $P_{\max, E_i}$ - max. amplitúda nárazovej sily pre hodnotu modulu pružnosti podložia E_i [kN]
 $P_{\max, E=25 \text{ MPa}}$ - max. amplitúda nárazovej sily pre modul pružnosti podložia $E=25$ MPa [kN]

Na obrázku 36 je prezentovaná korelačná závislosť $E_{def,2}$ určenej SZS podľa STN 73 6190 od modulu deformácie meraného zariadením LDD 100 objektivizovaná z dlhoročných výsledkov merania pracovníkov SvF UNIZA (2000 až 2020) a významných odborníkov z praxe (RNDr. Boris Starší, modrá krivka). Pri určení korelačnej závislosti Decký-Šrámek už nebolo uvažované s hodnotami na obrázku 34 nachádzajúcimi sa v modrej elipse.



Obrázok 36 - Mocninová a lineárna závislosť modulu deformácie z druhého zaťažovacieho cyklu $E_{def,2}$ od návrhovej hodnoty modulu pružnosti podľa [L11]

Tabuľka 15 - Prepočítané modulu deformácie $E_{def,2}$ od rázového modulu deformácie E_{vd}

TDZ Podľa STN 736114 (1)	Požadované hodnoty mechanických charakteristík podložia asfaltových vozoviek [MPa]					
	$min. E_{p,n}$ podľa TP 033 (2)	$E_{def,2}$ určené z $E_{p,n}$ (3)	E_{vd} určené z $E_{def,2}$		Pomer [-]	
			Starší (4)	Decký – Šrámek (5)	(4)/(3)	(5)/(3)
Diaľnice TDZ I	137 MPa	120*	61	67	0,51	0,55
	118 MPa	100	53	58	0,53	0,58
	108 MPa	90*	48	54	0,53	0,60
	≥ 90 MPa	72	40	46	0,55	0,64
IV až VI	88 MPa	70*	39	45	0,56	0,64
IV až VI	67 MPa	50*	29	35	0,58	0,70
I	≥ 60 MPa	44	26	32	0,60	0,73
II a III	≥ 40 MPa	29	18	24	0,63	0,81
IV až VI	≥ 30 MPa	19	13	17	0,68	0,91

* Požiadavky na podklad nestmelenej vrstvy a jeho únosnosť (vyjadrená modulom deformácie) v zmysle [T7]

5 Záver

V základných rysoch boli popísané normalizované skúšobné metódy zavedené v sústave slovenských technických noriem a prevzatých európskych noriem a rad nových skúšobných metód, ktoré zatiaľ nie sú zavedené v sústave slovenských technických noriem, označovaných v tejto práci ako nenormalizované. Nenormalizované metódy je možné v Slovenskej republike používať len po vzájomnej dohode zainteresovaných strán v stavebnom procese a ich výsledky sa považujú prevažne za informatívne alebo orientačné, pretože tieto metódy sa považujú za nedostatočne validované a verifikované. Aj napriek tomu, že mnohé z u nás nenormalizovaných metód sa v rôznych krajinách intenzívne využívajú, pretože ide o nedeštruktívne metódy poskytujúce operatívne a rýchle výsledky v dostatočnom množstve a kvalite, v našich podmienkach vzniká akýsi bludný kruh v tom, že nie sú zavedené v našej sústave noriem. Z toho dôvodu sa používajú zriedkavo alebo vôbec, čo vyvoláva dojem, že nie sú potrebné alebo žiadané a preto nie je dôvod ich zavádzať do sústavy noriem. Čiastočným riešením tohto problému, je čakať na ich zavedenie prostredníctvom preberania európskych noriem v rámci legislatívneho procesu Európskej únie. To je však častokrát dlhotrvajúci proces (pozri kap.4.8), čo je zrejme z praxe v poslednom desaťročí v oblasti noriem pre geotechnické terénne skúšobné metódy. Autorom zo Stavebnej fakulty UNIZA, v spolupráci s významnými odborníkmi z praxe, sa pre účely kontrol kvality zhutnenia zemín a sypanín podarilo objektivizovať nasledujúce kredibilitné korelačné závislosti a z nich vyplývajúce prepočty, ktoré uvádzame ako príklady metodiky použiteľnej aj pre nové skúšobné metódy uvedené vyššie:

- prepočet modulu deformácie z 2. zaťažovacieho cyklu $E_{def,2}$ [MPa] zistený statickou zaťažovacou skúškou na rázový modul deformácie E_{vd} [MPa] určený s ľahkou dynamickou doskou

$$E_{vd,Starší} = \left(\frac{E_{def,2}}{0,942} \right)^{\left(\frac{1}{1,176} \right)} \doteq 1,05 \cdot E_{def,2}^{0,85} \quad (9)$$

$$E_{vd, Decký-Srámek} = \left(\frac{E_{def,2}}{0,380} \right)^{\left(\frac{1}{1,379} \right)} \doteq 2,02 \cdot E_{def,2}^{0,73} \quad (10)$$

- prepočet návrhových hodnôt modulov pružnosti podložia $E_{p,n}$ [MPa], ktoré sú používané pri navrhovaní konštrukčného zloženia vozoviek, modulu deformácie z 2. zaťažovacieho cyklu $E_{def,2}$ [MPa], ktoré sú používané pre kontrolu kvality pri výstavbe

$$E_{def,2} = 0,307 \cdot E_{p,n}^{1,213} \quad (12)$$

$$E_{def,2} = 0,871 \cdot E_{p,n} \quad (13)$$

- prepočet $E_{def,2}$ [MPa] na návrhové hodnoty modulov pružnosti podložia $E_{p,n}$ [MPa]

$$E_{p,n} = \left(E_{def,2} / 0,307 \right)^{\left(\frac{1}{1,213} \right)} = 2,65 \cdot E_{def,2}^{0,82} \quad (14)$$

$$E_{p,n} = \left(E_{def,2} / 0,871 \right) = 1,15 \cdot E_{def,2} \quad (15)$$

Na základe rovníc uvedených v kapitole 5, autori [T1] optimalizovali minimálne požadovaného hodnoty $E_{p,n}$ v závislosti od triedy dopravného zaťaženia (TDZ) podľa tabuľky 16, ktorá je ilustráciou toho, akým spôsobom implementovať použiteľnosť nových skúšobných metód do technologických a konštrukčných noriem.

Odporúčané hodnoty únosnosti namerané na ochrannej vrstve vozoviek zhotovenej zo zmesi z ťaženého predvrveného kameniva (TPK) v závislosti na únosnosti podložia zodpovedajúce kodifikovaným ustanoveniam cestného zákona a požiadavkám technických podmienok z oblasti navrhovania vozoviek pozemných komunikácií TP 033 a TP 098 sú uvedené v tabuľke 16.

Najmenšia hodnota E_{def2} stanovená SZS na povrchu spodnej podkladovej vrstvy z TPK je pre:

- TDZ III..... 90 MPa, súčasne musí platiť podmienka: $E_{def2} / E_{def1} \leq 2,5$
- TDZ IV a V..... 70 MPa, súčasne musí platiť podmienka: $E_{def2} / E_{def1} \leq 2,5$
- TDZ VI..... 50 MPa, súčasne musí platiť podmienka: $E_{def2} / E_{def1} \leq 2,5$

Najmenšia hodnota E_{def2} stanovená SZS na povrchu hornej podkladovej vrstvy z TPK je pre:

- TDZ V100 MPa, súčasne musí platiť podmienka: $E_{def2} / E_{def1} \leq 2,5$
- TDZ VI 80 MPa, súčasne musí platiť podmienka: $E_{def2} / E_{def1} \leq 2,5$

Tabuľka 16 - Hodnoty únosnosti na povrchu ochrannej vrstvy vozovky z TPK [T1]

Modul pružnosti podložia E_{np} pre triedu dopravného zaťaženia (TDZ)		Hrúbka vrstvy z TPK [mm]	Ekvivalentné moduly na povrchu ochrannej vrstvy [MPa]		E_{def2} / E_{def1}	E_{vd} [MPa]
$E_{n,p}$ [MPa]	TDZ		E_p	$E_{def,2}$		
≥ 25	VI	150	35	30	$\leq 2,5$	25
		200	40	35		30
		250	45	40		
≥ 30	V	150	45	40		35
		200	50	45		
		250	55	50		30
≥ 35	IV	150	50	40		30
		200	55	45		
		250	60	50		35
150		55	45			
≥ 40		200	60	50		
		250	65	55		
≥ 45	III	150	60	50	$\leq 2,5$	35
		200	65	55		40
		250	70	60		
≥ 60	II	150	75	65		45
		200	80	70		
		250	90	80		50
≥ 90	I	150	110	95		55
		200	115	100		
		250	125	105		45
100	I v prípade diaľnic		100	85		50
110			110	95		55
120			120	105		45

E_{vd} – dynamický modul deformácie zistený ľahkou dynamickou doskou podľa STN 73 6192 a STN 73 6133

E_{def2} – statický modul deformácie vyhodnotený z druhého zaťažovacieho cyklu statickej zaťažovacej skúšky uskutočnenej podľa STN 73 6190 a STN 73 6133

E_{vd} – dynamický modul deformácie zistený ľahkou dynamickou doskou podľa STN 73 6192 a STN 73 6133

E_{def2} – statický modul deformácie vyhodnotený z druhého zaťažovacieho cyklu statickej zaťažovacej skúšky uskutočnenej podľa STN 73 6190 a STN 73 6133

Druhou cestou, ako dostať nové metódy do praxe, je nájdenie spôsobu, ako ich zaradiť do sústavy slovenských technických noriem buď vytvorením nových noriem alebo novelizáciou niektorých starších noriem formou príloh alebo pri revízii normy. Tento krok vyžaduje validáciu metódy, ktorej súčasťou je aj experimentálne potvrdenie spoľahlivosti metódy, určenie okrajových hodnôt a rozsahu merania a ostatných parametrov uznateľnosti metódy. Odborné pracoviská, ktoré sú schopné vykonávať validáciu týchto metód však nemôžu mať dostatočnú motiváciu na takúto činnosť, ktorá je časovo aj finančne náročná, pokiaľ jej výsledkom nie je praktická možnosť následného oficiálneho používania takejto metódy.

Z uvedených dôvodov navrhujeme postup, akým je možné nové nenormalizované metódy dostať do praxe v našich legislatívnych podmienkach.

Prvým krokom je umožnenie používania týchto metód na stavbách verejnej infraštruktúry investorov, ktorý používajú spoločnú databázu technických predpisov rezortu, ako Slovenská správa ciest, Národná diaľničná spoločnosť, Vyššie územné celky a v niektorých prípadoch aj mestá a obce). Pre tieto organizácie by bolo potrebné vypracovať technický predpis na úrovni TP, ktorý by obsahoval nenormalizované skúšobné metódy a možnosti ich použitia v praxi, napr. TP xxx Kontrola zhutnenia zemín a sypanín novými skúšobnými metódami. Predpis by obsahoval podmienky použitia týchto metód a stručné návody na ich validáciu. Takýto dokument by mohol byť v kombinácii so zahraničnými normami podkladom pre akreditačné orgány, napr. SNAS, čím by sa vytvorili podmienky na akreditáciu nových skúšobných metód na odborných pracoviskách, ktoré by mali záujem tieto metódy využívať.

Druhým zásadným krokom by malo byť vytvorenie novej slovenskej technickej normy, prípadne obnovenie dávnejšie zrušenej normy STN 72 1006 Kontrola zhutnenia zemín a sypanín, ktorá by mohla komplexne riešiť problematiku používaných aj nových skúšobných

metód. Obsah tejto normy alebo obdobného TP je v základných bodoch navrhnutý v záverečnom odstavci.

Súčasťou zadania RÚ bolo aj zadanie na určenie okrajových podmienok merania, podmienok kalibrácie a overovania meradiel a odporúčania na použitie nových metód v praxi pri kontrole zhutnenia zemín a sypanín. Vzhľadom na to, že tieto údaje sú rozptýlené v texte správy, uvádzame ich vo forme prehľadnej tabuľky (Tabuľka 17).

Tabuľka 17 – Prehľad podmienok merania, kalibrácie a použiteľnosti nových skúšobných metód pri kontrole kvality zhutnenia zemín a sypanín

Skúšobná metóda	Metódy kalibrácie a overovania	Použiteľnosť v konštrukcii	Okrajové podmienky merania
Geosonda, Humboldt H-4140	Kalibrácia na skúšobnom bloku od výrobcu prístroja. Porovnávacia metóda s NMS (Tabuľka 12).	Podložie násypu, Vrstvy násypu, Podkladové vrstvy stmelené a nestmelené, Základová škára, Stabilizované zeminy.	Max. zrno sypaniny priemeru do 150 mm, Stmelené vrstvy po zatvrdnutí s $E_{def,2} \geq 200$ MPa.
Elektronický hutnomer	Kalibrácia na skúšobnom bloku. Porovnávacia metóda s NMS (Tabuľka 12).	Podložie násypu, Vrstvy násypu, Podkladové vrstvy stmelené a nestmelené, Základová škára, Stabilizované zeminy, Tesniace vrstvy (minerálne tesnenie).	Max. zrno sypaniny priemeru do 63 mm, Stmelené vrstvy po zatvrdnutí s nemožnosťou zaradenia skúšobných trŕňov.
Proctorova ihla	Štandardná kalibrácia silomeru. Interná kalibrácia na valcoch Proctor. Porovnávacia metóda s NMS (Tabuľka 12).	Podložie násypu, Vrstvy násypu z jemnozrnných zemín, Základová škára z jemnozrnných zemín, Tesniace vrstvy.	Max. zrno sypaniny do 5 mm, Stmelené vrstvy po zatvrdnutí s nemožnosťou zatlačenia skúšobného hrotu.
DCP Panda a iné ľahké dynamické penetrometre	Štandardná kalibrácia výšky pádu závažia a snímačov zatlačenia Interná kalibrácia na valcoch Proctor alebo skúšky relatívnej uľahnutosti. Porovnávacia metóda s NMS (Tabuľka 12).	Podložie násypu, Vrstvy násypu, Podkladové vrstvy nestmelené, Základová škára, Stabilizované zeminy, Tesniace vrstvy (minerálne tesnenie).	Max. zrno sypaniny priemeru do 63 mm, Stmelené vrstvy po zatvrdnutí s nemožnosťou zaradenia skúšobných trŕňov.
Metóda Clegg	Štandardná kalibrácia výšky pádu závažia a snímačov zatlačenia. Interná kalibrácia na skúšobnom bloku. Porovnávacia metóda s NMS (Tabuľka 12).	Podložie násypu, Vrstvy násypu, Podkladové vrstvy nestmelené, Základová škára, Stabilizované zeminy, Tesniace vrstvy (minerálne tesnenie).	Max. zrno sypaniny priemeru do 63 mm, Stmelené vrstvy po zatvrdnutí s vysokou tuhosťou.
Metóda BCD	Interná kalibrácia na skúšobnom bloku. Porovnávacia metóda s NMS (Tabuľka 12).	Podložie násypu, Vrstvy násypu, Podkladové vrstvy nestmelené, Základová škára, Stabilizované zeminy.	Max. zrno sypaniny priemeru do 16 mm, Stmelené vrstvy po zatvrdnutí s vysokou tuhosťou.
Metóda CCC	Štandardná kalibrácia frekvencie a amplitúdy vibrácie valca, akceleračných snímačov. Porovnávacia metóda s NMS (Tabuľka 12).	Podložie násypu, Vrstvy násypu, Podkladové vrstvy stmelené a nestmelené, Stabilizované zeminy, Tesniace vrstvy (minerálne tesnenie).	Stmelené vrstvy po zatvrdnutí s vysokou tuhosťou nad rozsah meracieho zariadenia.

Technické podrobnosti použitia jednotlivých metód musia byť následne definované v technických predpisoch vyššieho rádu, napr. v technických podmienkach (TP) alebo slovenských technických normách (STN).

Ako všetky skúšobné metódy, či už normalizované alebo nenormalizované, aj metódy uvedené v tejto správe majú svoje výhody a nevýhody, s ktorými je potrebné uvažovať pri ich zavádzaní do výrobo-kontrolnej činnosti.

Výhody prezentovaných skúšobných metód:

- v prevažnej miere ide o nedeštruktívne metódy so žiadnym alebo minimálnym zásahom do integrity skúšanej konštrukcie,
- skúšky prebieha v krátkom časovom úseku v rozsahu 5 minút až 15 minút vrátane prípravy skúšobného miesta, takže je možné vykonať veľké množstvo meraní v pomerne krátkom časovom úseku a pokryť kontrolnými bodmi väčšiu plochu alebo väčší objem zemnej konštrukcie,
- veľké množstvo výsledkov skúšok umožňuje použiť metódy štatistickej kontroly kvality a odhaliť aj tie nehomogenity v konštrukcii, ktoré nemusia byť zistené pri menšej hustote kontrolných bodov vykonávaných doposiaľ používanými metódami,
- metódy vykonávané elektronickými hutnometri umožňujú nahradiť rádiometrické metódy, ktorých vykonávanie je organizačne a finančne náročné z hľadiska stále sa sprísňujúcej legislatívy z dôvodu, že sa v meracích prístrojoch používajú rádioaktívne materiály,
- meracie prístroje a zariadenia majú nižšiu hmotnosť a rozmery, sú menej náročné na fyzickú prácu, umožňujú merania aj v stiesnených priestoroch (rýhy, stavené jamy), sú ľahko prenosné a nevyžadujú doplnujúce zariadenia, napr. protiváhu používanú pre statické zaťažovacie skúšky, ktorá viaže kapacitu stavených strojov alebo vozidiel počas vykonávania skúšky.

Nevýhody prezentovaných skúšobných metód:

- potreba vypracovania novej technickej legislatívy pre ich používanie,
- potreba validácie, porovnávacích meraní a naviazania výstupných hodnôt zo skúšky na doteraz používané hodnoty a veličiny, tak ako sa to uvádza v tejto správe, čo je časovo náročný proces,
- v prípade niektorých skúšobných metód, napr. elektronické hutnomery, potreba nastavenia, resp. internej kalibrácie osobitne na každý druh skúšaného materiálu,
- potreba kvalifikovanej a kreatívnej pracovnej sily, čo ale platí aj pre normalizované skúšobné metódy,
- v prípade niektorých skúšobných metód užší rozsah použiteľnosti pre určité typy materiálov a užšie okrajové podmienky merania (Tabuľka 17).

Obnovená norma STN 72 1006 alebo TP Kontrola zhutnenia zemín a sypanín novými metódami by mohla obsahovať nasledujúce ustanovenia:

- v súčasnosti normalizované metódy v sústave STN (tabuľka 1) definovať s odvolaním na platné normy, ktoré tieto metódy upravujú, pričom použiteľný obsah starých noriem, napr. STN 73 1375 a iných by mohol byť prevzatý a staré normy by mohli byť zrušené, súčasne by boli doplnené nové poznatky a skúsenosti k používaniu týchto metód, ktoré v pôvodných normách nie sú uvedené,
- definovať nové v súčasnosti nenormalizované metódy, resp. metódy uvedené v predbežných európskych alebo národných normách a technickej dokumentácii výrobcov, pričom ich definovanie by malo vychádzať z fyzikálnych princípov merania a nemalo by byť viazané na konkrétne typy meracích prístrojov,
- definovať použiteľnosť nových metód vo vzťahu k spôsobu ich validácie koreláciou s výsledkami normalizovaných metód, stanovením okrajových podmienok vo vzťahu k vlastnostiam skúšaného materiálu a konštrukcie a možnostiam kalibrácie používaných skúšobných zariadení,
- definovať použiteľnosť nových metód vo vzťahu k predmetu skúšania tak, aby bolo jasne definované, ktorá metóda môže byť použitá pri hodnotení kvality materiálov a konštrukcií ako hlavná alebo rozhodujúca a ktorá ako doplnková alebo informatívna, napr. na efektívne zvýšenie počtu kontrolných bodov pre podrobnejšie hodnotenie predmetu skúšania.

Norma by mala obsahovať aj všeobecné ustanovenia a metodiky, ako inovatívne využiť výsledky vedecko-technického rozvoja a použiť aj skúšobné metódy a princípy, ktoré v súčasnosti nie sú používané v kontrole kvality zemných konštrukcií, ale sú predmetom vývoja alebo sa využívajú v iných oblastiach materiálového inžinierstva. Takýmto spôsobom by sa predchádzalo situáciám v akých sme v súčasnosti, že vznikajú nové prístroje a skúšobné zariadenia, ktoré sa nedajú použiť,

lebo pre ich použitie neexistuje technická legislatíva. Je to paradox, keď si uvedomíme, že už máme množstvo zavedených systémových noriem na všetky možné oblasti riadenia technických činností, ktoré zavádzajú rôzne formy certifikácií, autorizácií, akreditácií a notifikácií odborných pracovísk, v ktorých sa definujú požiadavky na zlepšovanie a inovácie, ktoré však často narážajú na limity používaných technických noriem a vzniká tak bludný kruh nesplniteľných požiadaviek, ktoré sa následne riešia len formálnymi technikami.