

SISTEMI ZA KONTINUIRANO KONTROLO ZGOŠČANJA – KONČNO V REDNI RABI TUDI V SLOVENIJI

ROLLER-INTEGRATED CONTINUOUS COMPACTION CONTROL – FINALLY IN OPERATION ALSO IN SLOVENIA

dr. Ana Petkovšek, univ. dipl. inž. geol.

ana.petkovsek@fgg.uni-lj.si,
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana

Primož Jurjavčič, univ. dipl. inž. grad.

primoz.jurjavcic@primorje.si, Primorje, d. d. Ajdovščina

Matej Maček, univ. dipl. inž. grad.

matej.macek@fgg.uni-lj.si,
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana

Zvonko Cotič, dipl. inž. grad.

zvonko.cotic@primorje.si, Primorje, d. d. Ajdovščina

Strokovni članek

UDK: 624.131.53

Povzetek | S terminom »kontinuirana kontrola zgoščanja« (CCC – Continuous Compaction Control) označujemo sodobne postopke zveznega spremljanja odzivov zemljine na vibracije, ki jih v tla prenašajo dinamični valjarji med obratovanjem. Merilni sistem, integriran v valjar, omogoča zvezen nadzor nad dogajanjem v tleh in zvezno spremljanje obratovalnih učinkov valjarja. Vrednosti, ki jih dobimo pri meritvah, so dinamične merilne vrednosti (DMV). Na doseženo kakovost zgoščenosti plasti sklepamo posredno, preko predhodnega umerjanja sistema, ki ga opravimo z uporabo klasičnih metod, predvsem z uporabo statične ali dinamične krožne plošče. Primorje Ajdovščina je leta 2007 uporabilo sistem CCC pri izgradnji dveh pregradnih nasipov na ČHE Avče, kar je prvi primer tovrstne gradnje v Sloveniji. V članku so predstavljeni postopki kontinuirane kontrole zgoščanja zemljin, dokumentirani z rezultati meritev na ČHE Avče in odsekih avtocest v Pomurju. Namen članka je poudariti prednosti rabe postopkov CCC in približati in pospešiti njihovo rabo na vseh področjih zemeljskih del.

Summary | The term »CCC – Continuous Compaction Control« defines contemporary procedures that enable continuous monitoring of soil responses to vibrations transferred by dynamic rollers into the soil during their functioning. The measuring system, integrated into the roller, enables continuous control over the events in the soil and continuous monitoring of the roller actions. The values obtained in the measurements with the CCC procedures are dynamic measuring values. The achieved compaction quality is deduced indirectly, through a preliminary calibration system, performed by using conventional methods, especially the static and dynamic circular plates. Primorje Ajdovščina used the Roller integrated continuous compaction control in 2007 during the construction of two embankment dams for the accumulation pool at the Pumping Power Station Avče (Slovenia). This was for the first time that the CCC system was used for quality control as well as acceptance criteria in Slovenia. The paper presents the procedures of continuous compaction control, documented with results from the job site Avče and some other motorway job sites. The purpose of the paper is to present the advantages of CCC systems and to bring the CCC procedures closer to all those who are directly or indirectly included into the process of the construction of embankments and other types of unbound layers.

1 • UVOD

Nasipi so v primerjavi z drugimi inženirskimi objekti nekaj posebnega. Grajeni so iz naravnih, bolj ali manj heterogenih zemljin in zdrobljenih kamnin, brez ali z zelo nizko stopnjo predhodne tehnološke predelave. Nasipni materiali ne podležejo odredbi o obveznem certificiranju gradbenih proizvodov. Njihove lastnosti so sezonsko spremenljive in zelo močno odvisne od vlage. Zgoščanje je najpomembnejši tehnološki postopek, ki se uporablja pri gradnji in daje vgrajeni zemljini načrtovane inženirske lastnosti: strižno trdnost, deformacijske karakteristike in prepustnost, vgrajeni plasti pa zahtevano togost, nosilnost in homogenost.

Zaradi nehomogenosti temeljnih tal in nasipnih materialov, zaradi spremenljivih vremenskih pogojev, zaradi različnih elementov, ki

jih je treba vgraditi v nasipe, je razumljivo, da se med zgoščanjem pojavijo lokalne nehomogenosti. Če niso pravočasno odkrite, se kasneje pokažejo v obliki prevelikih posedkov, diferenčnih posedkov, razpok, mest s povečano prepustnostjo, ranljivostjo za zmrzal in izpiranje ali na kakšen drug, za varnost in funkcionalnost objekta škodljiv način. Tveganje v primeru porušitev je pri različnih nasipih različno. Nasipi z izjemno visokim tveganjem so visoke nasute pregrade. Porušitev komaj dograjene pregrade »Teton dam« v ZDA je prikazana na sliki 1. Levo vidimo blatno brozgo, ki teče iz izvira na pregradi in nad njim enega od dveh buldožerjev, ki so jih poslali, da bi zasuila odprtino. Na sliki desno je stanje tik pred popolno porušitvijo, ki je nastopila v nekaj urah (Seed in Duncan, 1987). Zelo zahtevna

je gradnja visokih pobočnih nasipov prometnic, visokih rudniških jalovišč in odlagališč odpadkov (slika 2). Nasipe, ki nas varujejo pred poplavami, snežnimi plazovi ali padajočim kamenjem, le redko obravnavamo kot zahtevne inženirske objekte, pa vendar imajo njihove porušitve praviloma katastrofalne posledice. Vse pogostejšo medijsko informacijo – »nasip je popustil« – običajno povezujemo s silovitostjo naravne ujme, ne pa tudi s podcenjeno gradnjo ali vzdrževanjem nasipa. Po načelih nasipov gradimo specifične funkcionalne dele objektov, na primer mineralne tesnilne sloje v okoljskem inženirstvu, nevezane nosilne plasti pod statično in dinamično obremenjenimi površinami, zasipe cevovodov, zasipe temeljev in podpornih zidov itd. Porušitve teh plasti sicer direktno ne ogrožajo življenj, so pa usodne za konstrukcije, ki jih nosijo, na primer, za asfaltna vozišča, tirni trak, za puščanje cevovoda, za preboj tesnilne plasti in širjenje polutantov itd.



Slika 1 • Porušitev komaj dograjene pregrade »Teton dam«, Idaho, ZDA, leta 1976 (Sylvester, 2008)



Slika 2 • Izvedbeno zahteven visoki pobočni nasip Orehovica na izstopu iz predora V Zideh ob začetku in po končani gradnji

Današnje zahteve glede varnosti, stabilnosti, posedkov in diferenčnih posedkov nasipov so zelo stroge. Hkrati pa gradimo čedalje zahtevnejše nasipe, na voljo je vse manj časa za gradnjo, zlata pravila o obveznem mirovanju nasipov »čez zimo« so pozabljena, možnosti dostopa do kvalitetnih nasipnih materialov pa skorajda ni več. Pravi izbor zgoščevalnega sredstva in tehnike zgoščanja, oboje v povezavi z razpoložljivim nasipnim materialom in možnostmi celovitega nadzora zgoščenosti, nadomeščajo to, kar smo včasih dosegali z uporabo kakovostnih nasipnih materialov, počasno gradnjo, manj birokratsko naravnimi postopki kontrole kakovosti in večjo strpnostjo ob zaznavanju poškodb.

S terminom »kontinuirana kontrola zgoščanja« ali krajše CCC (CCC – Continuous Compaction Control, ali tudi RICCC – Roller Integrated CCC) označujemo postopke zveznega spremljanja odzivov zemljine na vibracije, ki jih v tla prenašajo dinamični valjarji med obratovanjem. Merilni sistem, integriran v valjar, omogoča zvezen nadzor nad dogajanjem v podlagi in hkrati zvezno spremljanje obratovalnih učinkov valjarja. Inteligentno zgoščanje je postopek, pri katerem se delovna stanja valjarja samodejno prilagajajo stanju podlage in pomenijo dodatno strojno nadgradnjo valjarjev z vgrajenimi sistemi CCC. Satelitska navigacija (GPS) omogoča upravljanje nasipavanja, zgoščanja in prevzemanje plasti na daljavo.

Gradnje nasipov, ki se zdijo na meji razumnega, so za preživetje nove družbe včasih edina rešitev. V nasipe druge faze letališča Kinsai v Osaki na Japonskem je vgrajenih 250 milijonov m³ zemljin (slika 3). Upravljanje vseh ladijskih dobav, raztovarjanje materiala, vgrajevanje nasipov in nadzorovanje gradnje poteka preko navigacije GPS, valjarji so opremljeni s sistemi CCC.

Leta 2007 je Primorje Ajdovščina na gradbišču ČHE Avče dogradilo prve nasipe z uporabo valjarjev z vgrajenimi sistemi CCC v Sloveniji. Meritve vertikalnih in horizontalnih deformacij na dograjenih nasipih kažejo, da je z rabo CCC možno dosegati neprimerljivo boljšo kakovost gradnje od tiste, ki jo lahko dosegamo s klasičnimi postopki.

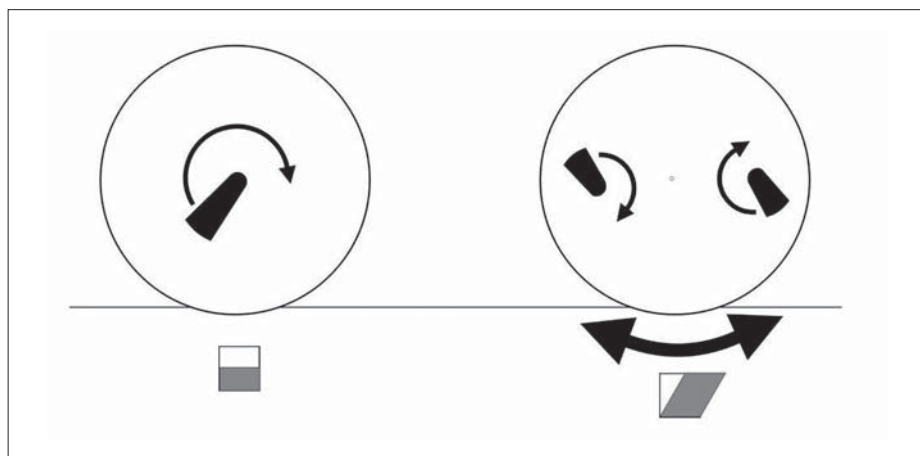


Slika 3 • Gradnja druge faze letališča Kinsai (Osaka) na umetnem otoku leta 2006

2 • ZGOŠČANJE IN UPORABA SISTEMOV CCC

2.1 Statična in dinamična interakcija med zemljino in valjarjem

Zemljine, zdrobljene kamnine in njim podobne materiale (žlindre, elektrofiltrske pepele, sadre, gradbene odpadke itd.) vgrajujemo v nasipe ali deponije z zgoščanjem s statičnimi in dinamičnimi valjarji, ki so vibracijski ali oscilacijski. Za gradnjo nasipov praviloma uporabljamo vibracijske valjarje, oscilacijske pa le izjemoma, na primer v bližini stavb (slika 4). Pri statičnem valjanju se zemljina zgošča pod lastno težo valjarja. Ta z vožnjo v »statičnem prehodu« potiska zrna zemljine v stabilnejšo lego in jih na ta način gosti na račun manjšanja volumna z zrakom zapolnjenih por. Učinki statičnega valjanja so omejeni na površino



Slika 4 • Shema delovanja bobna vibracijskega in oscilacijskega valjarja (Adam, 2000)

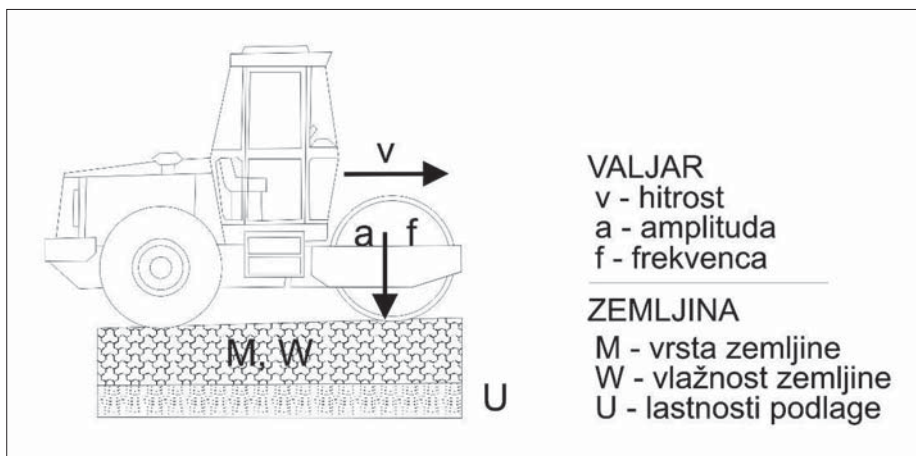
in tanjši sloj zemljine tik pod površino plasti. Raba postopkov CCC za valjarje v statičnem prehodu ni možna.

Pri vibracijskem valjanju se zemljina zgošča zaradi kombiniranih učinkov lastne teže valjarja in dinamičnih učinkov. V bobnu valjarja je ekscentrično nameščena masa, ki rotira okoli osi z enakomerno hitrostjo. Z nihanjem bandaže (bandaža je jeklen obroč na bobnu valjarja) se v podlagi vzbudi kompresijsko valovanje. Zaradi gibanja izgubijo zrna zemljine medsebojni kontakt, trenje med zrni se začasno zmanjša, sosednja zrna se delno obrusijo in predrobijo ter nato – tudi pod vplivom lastne teže valjarja – dokončno preuredijo v novo, gostejšo strukturo.

Pri klasičnem zgoščanju z vibracijskimi valjarji privzemamo, da so lastnosti valjarja konstantne, spreminjajo pa se lastnosti nasipnega materiala in podlage (slika 5). Valjarje opišemo s statično maso, ki je na zemeljskih delih običajno od 4 do 25 ton, maso jarma, obliko in velikostjo bobna, frekvenco in amplitudo. Novejši valjarji imajo možnost dvojne nastavitve na t. i. nizko in visoko frekvenco in amplitudo. Hitrost valjanja je običajno od 2 do 6 km/h. Lastnosti zemljine so spremenljive, odvisne od narave mineralnih zrn, zrnaste sestave in oblike zrn, vlažnosti ter prepustnosti za zrak in vodo. Vrsto valjarja in debelino nasute plasti izberemo glede na značaj nasipnega materiala, število prehodov in hitrost valjanja pa na osnovi točkovnih meritev zgoščenosti, dosežene na poskusnem polju.

Zgoščanje z uporabo valjarjev z vgrajenimi sistemi CCC pa je, nasprotno kot klasično zgoščanje, zasnovano na zasledovanju povečanja togosti podlage med valjanjem. Z naraščanjem togosti se obratovalna stanja v nihanje vzbujene bandaže spreminjajo (tabela 1).

Stalen stik med bandažo in podlago nastopi le takrat, ko je plast v rahlo nasutem stanju ali ko valjamo mehke, deformabilne gline. Najučinkovitejše je zgoščanje v stanju privzdigovanja. Bandaža izgubi za kratek čas stik z zemljino v času enega obrata ekscentra. Z naraščajočo togostjo podlage se čas izgube stika povečuje, dokler bandaža ne preide v poskakujoči način obratovanja. Obratovalni cikel bandaže se spremeni z enega na dva obrata ekscentra. Vsak drugi cikel zgošča podlago, nato pa mu sledi cikel, ko valjar ne zgošča, saj je bandaža večino časa v zraku. V tej fazi zaradi večjih sil pride do povečanega drobljenja zrn na površini plasti, rahljanja zgornjega sloja podlage in povečana izrabe ležajev stroja. Temu stanju se moramo med



Slika 5 • Interakcija valjar-zemljina (prirejeno po Thurner in Sandstrom, 2000)

GIBANJE VALJA	STIK ZEMLJINA-VALJ	OBRATOVALNO STANJE	ODZIVNA SILA ZEMLJINE	MOŽNOST DELA S CCC	TOGOST ZEMLJINE	HITROST VALJARJA	AMPLITUDA VALJA
PERIODIČNO	STALEN	STIK		DA	nizka	velika	majhna
	SE PERIODIČNO IZGUBLJA	PRIVZDIGOVANJE		DA	↓	↑	↓
		POSKAKOVANJE		ni priporočljivo			
NIHANJE	KAOS		NE				
KAOTIČNO	SE NE PERIODIČNO IZGUBLJA	KAOS		NE	visoka	majhna	velika

Tabela 1 • Obratovalna stanja bandaže (ISSMGE, TC 3)

valjanjem izogibati, kolikor je mogoče dolgo, na ta način, da povečamo hitrost vožnje ali znižamo amplitudo.

Obratovanje v načinu opletanje, v katerem bandaža udarja ob tla izmenično na levi in desni strani, ter v načinu kaotičen nastopa pri zelo togih tleh v kombinaciji z neustreznimi parametri valjarja in/ali prenizko hitrostjo vožnje. V tem obratovalnem načinu valjarja ni možno krmiliti, nadaljnje zgoščanje pa ni več možno.

2.2 Raba sistemov CCC in dinamična merilna vrednost

Rezultat meritve CCC je dinamična merilna vrednost (DMV), ki je relativna vrednost in jo lahko primerjamo s klasičnimi parametri, t. i. deformacijskimi moduli (poznamo jih tudi kot »nemški« E_{v2} in E_{v1} , »švicarski« M_E , »dinamični« E_{vd}), gostoto ali relativno zgoščenostjo (D_{PR})

le na točno določeni kombinaciji valjarja in podlage. Dinamičnih merilnih vrednosti pri postopkih CCC tudi ni možno medsebojno primerjati z uporabo različnih empiričnih postopkov, kot to sicer velja za zveze $E_{v2}-M_E-E_{vd}$. DMV je izmerjena oziroma izračunana iz nihanja bandaže in se vedno nanaša na podlago, ki se lahko privzame kot homogen polprostor, z določeno gostoto, elastičnim modulom, strižnim modulom itd., ki sam od sebe ne more zanihati. Nihajoča masa valjarja lahko ustvari sistem nihanja z lastno frekvenco in resonanco. Resonanca nihanja sistema podlaga in masa valjarja je odvisna od togosti, gostote in dušenja, na katerega vpliva energija, potrebna za premikanje zrn v materialu, notranje trenje zrn in valovanje na površini in v plasti. Energijo, ki se porabi zaradi dušenja, je treba nadomestiti s pogonom merilnega valjarja. Količino te energije je možno

določiti iz naležne sile (pritiska) bandaže na podlago ter poti nihanja bobna. Za izračun potrebujemo znane statične in dinamične parametre valjarja in pospeške, izmerjene z ustreznim merilnikom, pritrjenim na nosilnem jarmu bobna (slika 6).

Pri postopkih CCC je delovni valjar hkrati tudi merilni valjar, ki meri odzive bandaže med valjanjem, te odzive analizira v procesni enoti in jih prikaže na zaslonu, nameščenem v kabini valjarja. Teoretske osnove merjenja so podrobno opisane v številnih dokumentih ((Adam in Kopf, 2000a), (Floss in Kloubert, 2000)).

2.3 Zemljine, primerne za rabo sistemov CCC

Na začetku so bili sistemi CCC razviti za delo v granuliranih, nevezljivih materialih: prodir, peskih in zdrobljenih kamninah, kjer so še vedno najučinkovitejši. Sisteme CCC je možno uporabljati tudi v vezljivih in mešanih vezljivih zemljinah, vendar pa je vpliv vlage na togost in dinamične merilne vrednosti vezljivih plasti zelo velik, zato je potrebna pri taki rabi podatkov DMV posebna previdnost in izkušnost. CCC je možno učinkovito uporabljati tudi pri vgrajevanju različnih industrijskih in komunalnih odpadkov in recikliranih materialov.

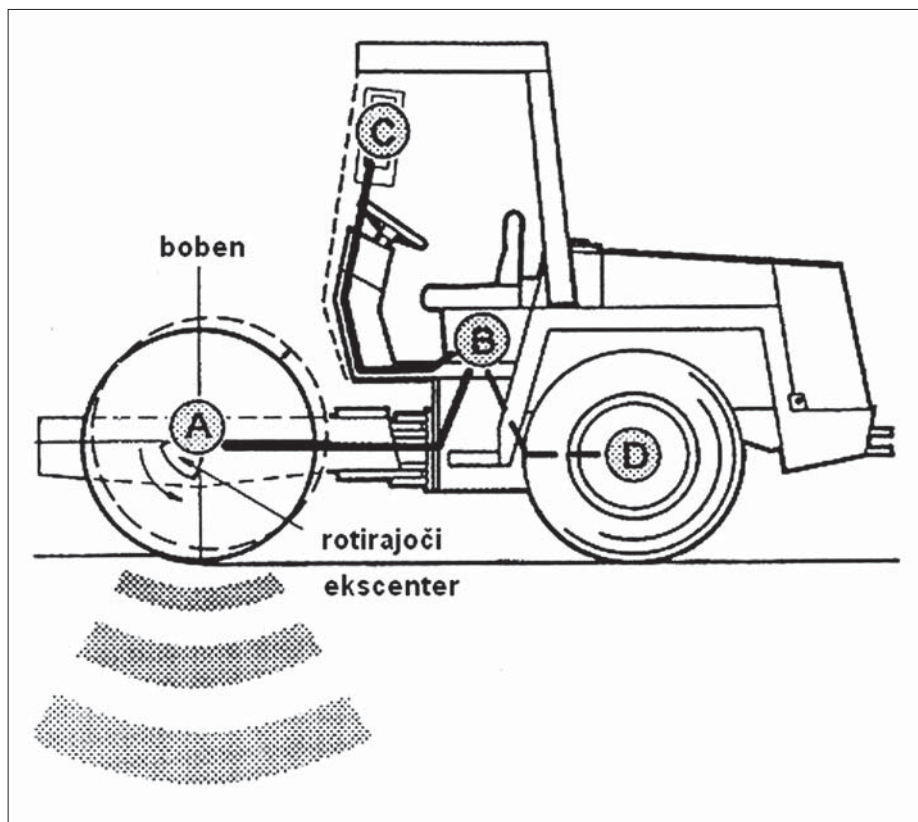
Pri zrnatih materialih je priporočljivo, da je velikost zrn manjša od 120 mm. Kadar se vgrajujejo debelejši materiali, je treba paziti na ravnost valjane površine.

2.4 Globine merjenja

Globinski doseg merjenja dinamičnih merilnih vrednosti je večji od globinskega učinka valjarja pri zgoščanju. Kadar so temeljna tla pod plastjo, ki jo valjamo, slabo utrjena, nehomogena ali iz drugačnega materiala, se to odraža na rezultatih meritev. Take pojave imenujemo »vpliv podlage« in jih moramo pri kalibraciji ali vrednotenju stanja upoštevati. Orientacijska merilna globina 10-tonskega valjarja je 0,6–1,0 m, 12-tonskega 0,8–1,5 m in 16-tonskega 1–2 m.

2.5 Snemanje, zapisovanje in dokumentiranje dinamičnih merilnih vrednosti

V tem trenutku prevladujejo na svetovnem trgu trije sistemi zapisov dinamičnih merilnih vrednosti (tabela 2). Kompaktometer proizvajalca Geodynamik s švedskega primerja amplitude pospeškov vzbujajočega nihanja in nihanja tal. Merilni sistemi proizvajalcev Bomag (Terameter) ali Ammann (ACE) pa merijo



Slika 6 • Shematski prikaz valjarja z vgrajenim sistemom CCC. A – merilnik pospeškov, B – procesor, C – ekran, D – detektor položaja (GPS)

silo in pripadajoči pomik. Merjene vrednosti so različne in neprimerljive zaradi različnih načinov interpretacij rezultatov.

Spremljanje in dokumentiranje rezultatov meritev se izvaja na različnih nivojih obdelave. Strojnik v valjarju v vsakem trenutku spremlja dinamično merilno vrednost in jo primerja s fistimi, izmerjenimi pri predhodnih delovnih prehodih, ali z referenčno vrednostjo, določeno pri kalibraciji. Zadnji člen v verigi kontrole pa je dokumentacijski sistem. Ta omogoča registriranje in analiziranje vseh korakov od začetka do konca valjanja in mora biti zaščiten pred zunanjimi posegi.

Dinamična merilna vrednost se zapisuje pri vsakem prehodu valjarja v vsaki kolesnici. Registrira se samo v dinamičnem prehodu naprej, prehod nazaj pa se izvaja statično in brez zapisa. Primer zapisa merilnih vrednosti, izpisanih takoj po valjanju, po treh merilnih prehodih, vidimo na sliki 7. Po prvem prehodu (zapis 3.1) poteka krivulja v območju nizkih vrednosti in je izrazito žagaste oblike, kar kaže na neenakomerno zgoščeno podlago. Po drugem in tretjem prehodu (zapisa 3-2 in 3-3) se krivulja premakne v območje višjih merilnih vrednosti, predvsem pa se izravna, kar dokazuje homogeno utrjenost plasti.

Sistem CCC	Vrednost CCC	Definicija	Proizvajalec
Kompaktometer	CMV	Primerja frekvence	Geodynamik, Švedska
Terameter	OMEGA (Nm)	Primerja čase	Bomag, Nemčija
Terameter	E_{vib} (MN/m ²)	Primerja čase	Bomag, Nemčija
ACE	k_b (N/m)	Primerja čase	Ammann, Švica

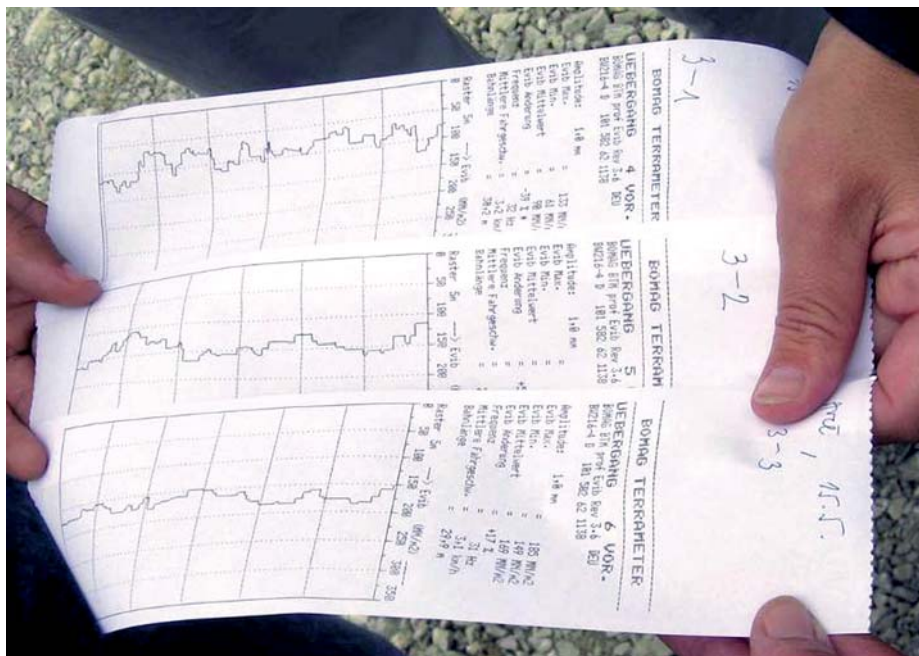
Tabela 2 • Uveljavljeni zapisi dinamičnih merilnih vrednosti za sisteme CCC različnih proizvajalcev

S pomočjo zapisa hitro in zanesljivo odkrijemo anomalije v podlagi in učinkovitost zgoščanja po posameznem prehodu. Primer na sliki 8 kaže, kako je možno iz primerjave zapisov po štirih prehodih ugotoviti, da so bili prvi trije prehodi učinkoviti, saj so dinamične merilne vrednosti naraščale, četrti prehod pa je bil neučinkovit. Za nadzornika je pomemben tudi zapis odklonov navzdol v petem pasu, kjer je nehomogenost v podlagi in z njo pogojeno šibko mesto ostalo tudi po končanem valjanju. Primer na sliki 9 kaže, kako je sistem CCC zaznal skalo (skok navzgor) in glino (skok navzdol) v podlagi pri valjanju v eni kolesnici. Načini registriranja in zapisovanja dinamičnih merilnih vrednosti se pri različnih proizvajalcih nekoliko – a ne bistveno – razlikujejo. V najosnovnejši obliki ima strojnik na stroju le možnost nadzora vrednosti DMV, in to brez izpisa. V takem primeru so pridobljeni podatki le v pomoč izvajalcu, da racionalizira postopke dela, ne morejo pa služiti za potrjevanje kakovosti in prevzem vgrajene plasti. Nadgrajene oblike sistemov CCC (t. i. Compaction Management) pa omogočajo upravljanje s podatki in obdelavo podatkov za vsako posamezno kolesnico ali za vse kolesnice na določenem odseku. Glede na podatke kalibracije se opravi evalvacija in statistična obdelava podatkov na nivoju, potrebnem za dokazilo kakovosti, in prevzem posamezne in vseh nasipnih plasti. Rezultati CCC po kalibraciji se lahko uporabljajo kot merodajni kriteriji za prevzemanje nasipnih plasti na nivoju notranje in zunanje kontrole.

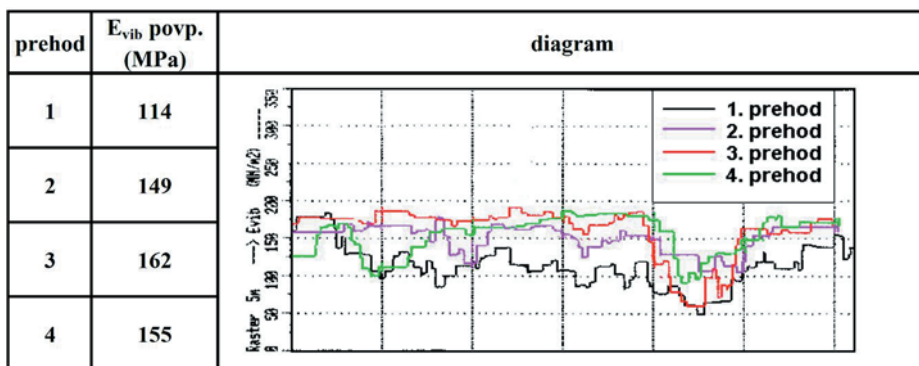
2.6 Kalibracija sistemov CCC

Kadar želimo podatke CCC uporabiti tudi za kvaliteto prevzemanje plasti, moramo sistem CCC, valjarja in nasipne zemljine kalibrirati. To izvedemo tako, da vrednosti DMV primerjamo s klasičnimi točkovnimi meritvami. Za točkovno merjenje lahko uporabimo kateri koli uveljavljen postopek, na primer merjenje gostote z izotopsko sondo, ali z nadomestnimi postopki, merjenje različnih parametrov s krožno ploščo (E_{v2} , E_{v1} , M_E , E_{vd} , k_{sv} , CBR). S tako primerjavo dobimo funkcijo, ki za konkretni primer valjar-zemljina pretvori DMV v točkovno meritev.

Postopek kalibracije poteka na poskusnem polju znotraj florisla bodočega nasipa. Na izbranem odseku zgoščamo zemljino v isti kolesnici, dokler se DMV med zaporednima prehodoma večja za več kot 5%. Med posameznimi prehodi na mestih konstantne DMV opravimo točkovne meritve. Za uspešno kalibracijo potrebujemo vsaj devet



Slika 7 • Izpise dinamičnih merilnih vrednosti je možno pregledati že na terenu, takoj po vsakem delovnem/merilnem prehodu; terameter na ČHE Avče, maj 2007



Slika 8 • Primerjava dinamičnih merilnih vrednosti po štirih zaporednih prehodih; terameter, avtocestni nasipi pri Dolgi vasi, marec 2007



Slika 9 • Zapis dinamične merilne vrednosti in anomalij v podlagi; terameter, ČHE Avče, maj 2007

točkovnih meritev. Po izkušnjah so za izvajanje točkovnih meritev najprimernejše meritve statičnega (E_{v1}) ali dinamičnega modula (E_{vd}). Meritve E_{vd} so ugodne zaradi hitre izvedbe in primerljivosti principov merjenja z delovanjem CCC. Zaradi odstopanj pri točkovnih meritvah E_{vd} naredimo v radiju 1 m od izbrane točke po štiri take meritve. Za boljšo kalibracijo lahko uporabimo tudi več kontrolnih točk. Med samo kalibracijo ne smemo spreminjati načina zgoščanja (amplituda, frekvenca in hitrost), paziti pa moramo na morebitne lokalne vplive cevovodov, morfološko razgibane podlage, robnih pasov itd. (slika 10).

Sovisnost med dinamično merilno vrednostjo in referenčnim točkovnim parametrom določimo na osnovi linearne regresije in prikazemo v grafični obliki (slika 11). Postopek je natančno opisan v (TSC, 2005).

V času redne gradnje nasipa v kalibracijski diagram dodajamo nove izmerjene vrednosti, ki lahko potrjujejo začetno kalibracijo, ali pa tudi ne. V primeru večjih odstopanj moramo izdelati novo poskusno polje in novo kalibracijo.

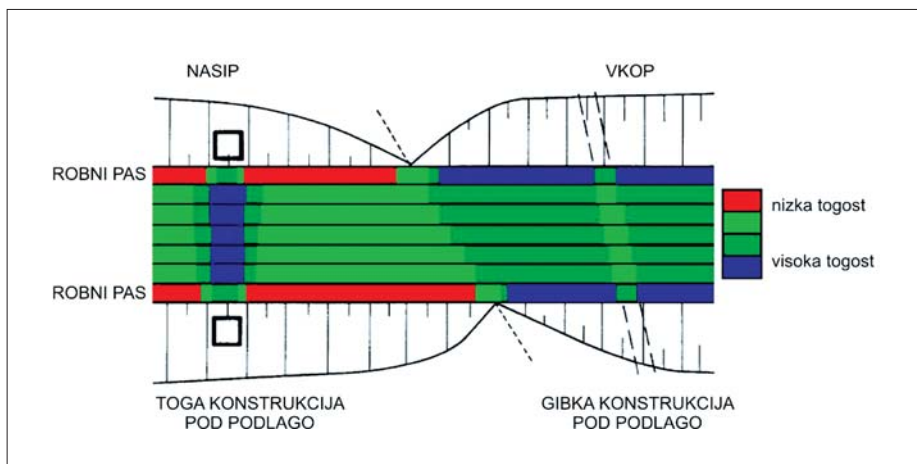
Pri zgoščanju moramo vselej zadostiti pogoju, da je prirast DMV med zadnjima zaporednima prehodoma manjši od 5 %. Šele nato preverjamo, ali je dosežena zgoščenost ustrezna ali ni. Pri tem je treba preveriti več možnosti (ISSMGE – TC 3):

- Povprečni DMV mora biti višji od srednje (zahtevane) vrednosti.
- Nikoli ne sme biti vrednost DMV nižja od spodnje meje za več kot 10 %.
- Če je vrednost DMV nižja od spodnje meje, ne sme biti hkrati nad zgornjo mejo.
- Če DMV ni nikoli pod spodnjo mejo, standardna deviacija DMV ne sme biti večja od 20 %.

2.7 Zgodovina rabe CCC in tehnične specifikacije za rabo sistemov CCC

Prvi sistem za zvezno merjenje učinkov zgoščanja je patentiral švedsko podjetje Geodynamic leta 1978, prvi valjar z vgrajenim sistemom CCC pa je bil razstavljen v Parizu leta 1980. Trenutno so na trgu trije vodilni proizvajalci sistemov CCC: Geodynamic na Švedskem, Bomag v Nemčiji in Ammann v Švici.

Prva priporočila za rabo CCC so izdelali v Nemčiji leta 1993, leta 1994 pa so izšli dodatni pogodbeni tehnični pogoji (ZTVE-STB, 1994). Tehnične specifikacije za rabo CCC imajo na Švedskem, v Švici in Avstriji. Avstrijske smernice RVS 8.S.02.6 so služile kot osnova za izdajo mednarodnih priporočil (ISSMGE – TC 3). Postopki CCC so del

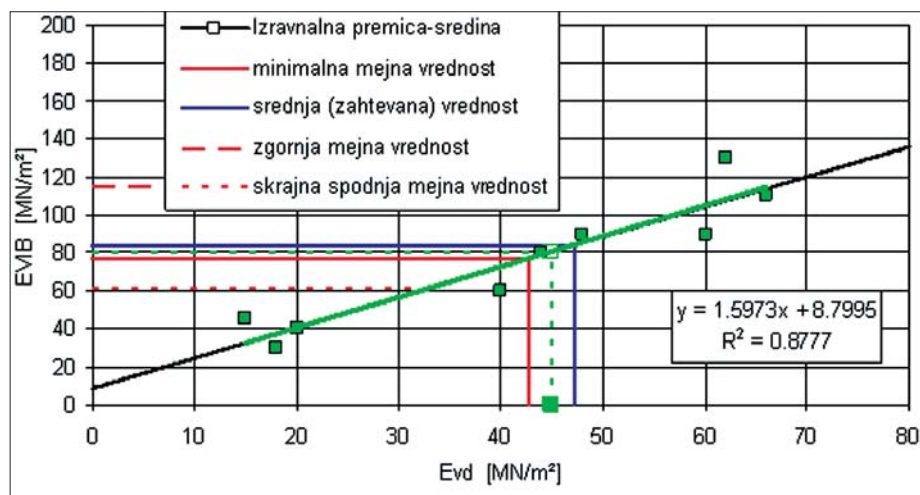


Slika 10 • Valjarji z vgrajenimi sistemi CCC zaznavajo vplive podlage, zato jih lahko uporabimo tudi kot detektorje zasutih jarkov in cevi; pri kalibraciji se moramo izogibati vplivom podlage

običajnih postopkov za kontrolo kakovosti zemeljskih del povsod po svetu, na velikih gradbiščih v razvitih državah obvezno zahtevani del opreme za zgoščanje, v številnih primerih pa tudi edini možni način potrjevanja kakovosti. Na sliki 12 je prikazana suha stran 233 m visoke nasute pregrade Shuibuja na Kitajskem. V pregrado je vgrajenih 15 milijonov m^3 zdrobljenega kamnitega materiala. Trije 25-tonski inteligentni valjarji so dnevno vgradili v pregrado od 15.000 do 20.000 m^3 materiala. Kontrola zgoščanja se je izvajala s sistemi CCC – terometri (Adam, 2007).

V Franciji so razvili poseben sistem merilnega valjarja, in sicer portancemeter (slika 13), ki se uporablja le za meritve zgoščenosti plasti, ne pa tudi kot delavni valjar (Quibel, 1998).

V Sloveniji je prvi vibracijski valjar tipa AMMANN z vgrajenim kompaktnometrom preizkušalo Cestno podjetje Celje leta 1994. Težko razumemo, zakaj v Sloveniji ni prišlo do vzpodbujanja rabe CCC na velikih avtocestnih in hidrotehniških nasipih, ki so se gradili po letu 1994. Leta 2001 je DARS financiral razvojno nalogo na temo rabe CCC. Raziskave so potekale na visokih nasipih pred predorom Ločica – zahod na avtocestnem odseku Vransko–Blagovica, z ekipo in stroji Ammann podjetja CMC Celje. Rezultati raziskave so pokazali izjemne prednosti rabe sistemov CCC v primerjavi s konvencionalnimi metodami, še posebej pri detekciji slabih mest v nasipnih plasteh, grajenih iz zdrobljenih laporjev, izkopanih v predoru (Petkovšek, 2002).



Slika 11 • Primer kalibracijske krivulje za plast, na kateri se zahteva vrednost $E_{vd} = 45$ MPa

Leta 2005 je Direkcija Republike Slovenije izdala tehnično specifikacijo TSC 06.713 z naslovom *Meritve gostote: Postopki kontinuiranih površinskih dinamičnih meritev*, ki je bila kot osnutek pripravljena že leta 2003. Podjetje Primorje, d. d., je v letu 2006 posodobilo strojni park z nakupom novih valjarjev proizvajalca Bomag, opremljenih s terometri. Obsežno testiranje valjarjev in merilne opreme sta omogočila DARS na avtocestnih nasipih pri Dolgi vasi ter HSE na visokih pregradnih nasipih ČHE Avče. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo UL je v sodelovanju s Komisijo za zemeljska dela pri DARS-u v maju 2007 organizirala dvodnevno delavnico, ki jo je vodil eden vodilnih svetovnih strokovnjakov na tem področju, in sicer dr. Adam s Tehniške univerze na Dunaju.

Visoki pregradni nasipi ČHE Avče so edini do leta 2008 v Sloveniji zgrajeni nasipi, na katerih so se valjarji, opremljeni s sistemi CCC, uporabljali kot delovni in merilni valjarji, naročnika – Holding Slovenske Elektrarne (HSE) in Soške elektrarne Nova Gorica (SENG), pa sta rezultate DMV potrdila kot merodajne za kvalitetni prevzem plasti.



Slika 12 • Nasuta pregrada Shuibuja, Kitajska je visoka 233 m, v peti je široka 616 m (Adam, 2007)

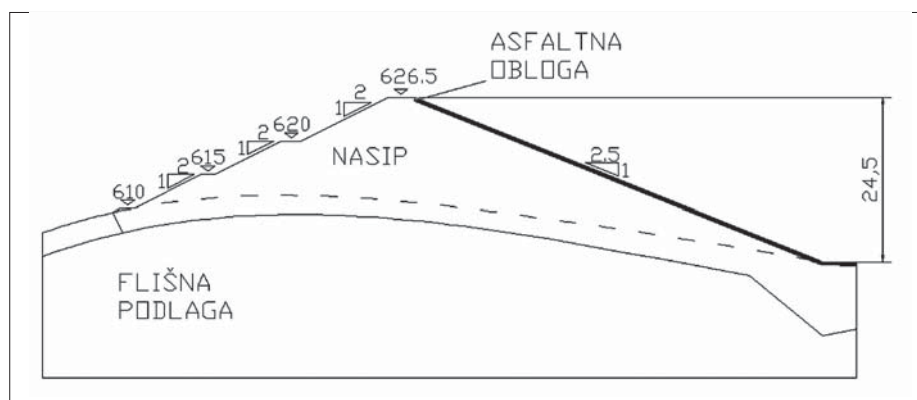


Slika 13 • Portancemeter za zvezno merjenje zgoščenosti plasti (CETE, Francija)

3 • GRADNJA PREGRADNIH NASIPOV NA ČHE AVČE

3.1 Predstavitev lokacije

Črpalna hidroelektrarna (ČHE) Avče je prvi tovrstni objekt v Sloveniji. Akumulacijski bazen s koristnim volumnom 2,3 milijona m³ je lociran na Kanalskem Vrhu na nadmorski višini 600–625 m, strojnica pa je ca. 600 m nižje v dolini Soče v Avčah. Med bazenom in strojnico je cevovod, po katerem bo elektrarna črpala vodo v času, ko je poraba energije nizka, in s praznjenjem bazena proizvajala elektriko v času konic. Bazem je lociran v naravni, polodprti kraški kadunji, ki jo je bilo treba poglobiti in za potrebe akumulacije zapreti z dvema nasipoma višine ca. 25 m. Večji nasip



Slika 14 • Karakteristični prerez »velikega« nasipa za zgornji bazen ČHE Avče



Slika 15 • Volumski razpad fliša na ČHE Avče

je dolg približno 400 m, manjši pa približno 200 m. Karakteristični prerez nasipa je prikazan na sliki 14. Tesnjenje dna, nasutih in vkopanih brežin je zasnovano z asfaltno oblogo, položeno na tamponski sloj iz drobljenega kamnitega materiala. Projekte je izdelalo podjetje Colenco – Korona, ki se je v času gradnje na gradbišču soočalo s številnimi pojavi, ki jim radi pravimo »geološka presenečenja« in so zahtevala številne spremembe in dopolnitve projekta.

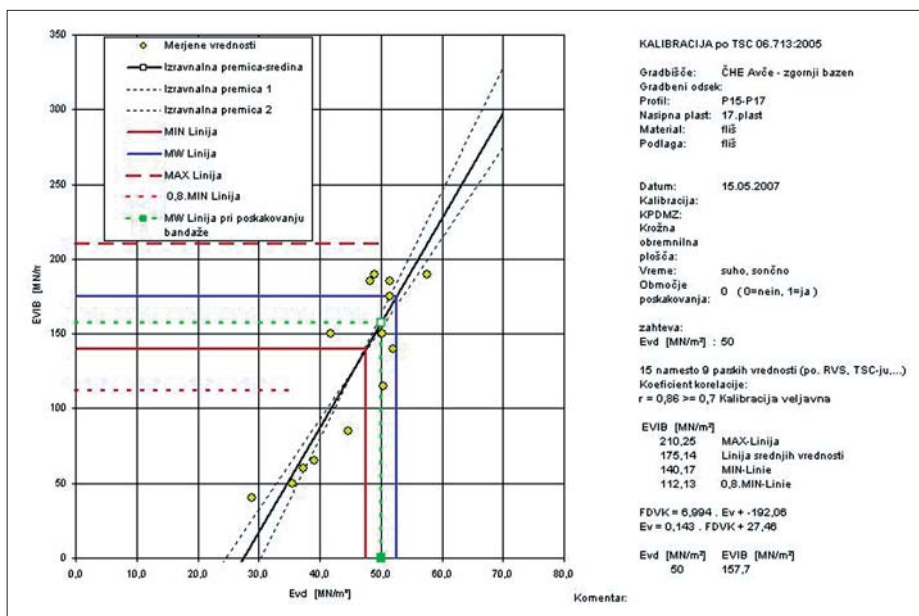
Širše vplivno območje bazena je zgrajeno iz zakraselega fliša kredne starosti. V flišu se menjavajo različni mehkih, malo odpornih kamnin, kot so glinavci in laporovci, in plasti trdnejših peščenjakov in apnencev – kalkarenitov. Izskopi v bazenu so potekali z uporabo buldožerjev z rijači, bagri s konico in z občasnim miniranjem v trdnejših kamninah. Pridobljeni izkopni materiali so imeli značaj debelo zrnate, mešane, glinasto gruščnate zemljine klasifikacije »GC – GM s samicami«.

3.2 Gradnja nasipov akumulacije iz lokalnega fliša – da ali ne

Odločanje o rabi fliša za visoke nasipe je vselej povezano s številnimi neznankami in veliko inženirsko odgovornostjo. Ključni problem, s katerim se srečujemo pri delu s flišem povsod po svetu, je ta, da zdrobljenega fliša ne moremo vrednotiti niti kot zemljinski (earth fill) niti kot kamniti nasip (rock fill), zato so možnosti nadzorovanja zgoščenosti in homogenosti med gradnjo zelo omejene.

Razponi lastnosti flišnih materialov iz izkopov na lokaciji bazena so naslednji:

- prostorninska masa zrn: $\rho_d = 2200\text{--}2650 \text{ kg/m}^3$
- indeks točkovne trdnosti kamnine: $Is_{(50)} = 0,02\text{--}2,21 \text{ MPa}$ in $c_0 = 0,5\text{--}49 \text{ MPa}$
- indeks obstojnosti kamnine: $I_{d2} = (26,1\text{--}83,6 \%)$ do $(91\text{--}98 \%)$
- meja židkosti finih zrn v izkopanem materialu: w_L : do 60 %



Slika 16 • Rezultati kalibracije valjarja na poskusnem polju nasipa ČHE Avče

- indeks plastičnosti finih zrn: I_p : neplastična v kalkarenitu, 20–35 % v drobljenem laporju
- vlaga: $w_0 = 1,1\text{--}7 \%$
- optimalna vlaga po Proctorju: w_{opt} : 6–10 %
- maksimalna suha gostota po Proctorju: ρ_{dmax} : 2170–2200 kg/m³

Na sliki 15 je prikazan primer razpadanja bloka flišne kamnine na izkopu. Blok volumna ca. 1 m³ razpade najprej v manjše bloke in grušč, nato pa počasi prepereva v glino. Čas razpada bloka na prostem je od nekaj dni do nekaj mesecev. Na sliki desno je viden ploskovni zdrs preperelega fliša po gladki porušnici po še nerazpadlem flišu na severni vkopni brežini bazena.

Izkušnje kažejo, da se visoki nasipi iz inertnih materialov po izgradnji sesedejo za ca. 1–3 % lastne višine. Sesedki so posledica neenakomernega zgoščanja v času gradnje, konsolidacije spodnjih nasipnih plasti zaradi dodatne obtežbe z zgornjimi deli nasipa ter

ekvilibracije vlage v povezavi s preurejanjem zrn v stabilno lego.

Na flišnih nasipih se sesedki še dodatno povečajo zaradi razpadanja »velikih« zrn v skeletu in polnjenja por s finimi produkti razpadanja. Zaenkrat še ne znamo napovedati, kako se bo posamezno, volumsko nestabilno zrno fliša obnašalo po vgradnji v nasip. Za preprečevanje nevarnosti in posledic dodatnega sesedanja je treba zagotoviti dovolj gosto strukturo, dovolj visoko stopnjo saturacije med gradnjo in dovolj časa za ekvilibracijo vlage (Petkovšek in Majes, 2001). Rezultati točkovnih meritev gostote z izotopsko sondo ali deformacijskih modulov s ploščo ne pokažejo pravega stanja, saj je njihov globinski doseg premajhen, trenje med zrni v sveže zgoščeni plasti pa dovolj visoko, da dobimo lažen vtis o visoki trdnosti in togosti plasti. Pomanjkljivosti klasičnih točkovnih metod merjenja gostote in togosti lahko nadomestimo z rabo valjarjev z vgrajenimi sistemi CCC in spremljajočim nadzorovanjem sukucije.

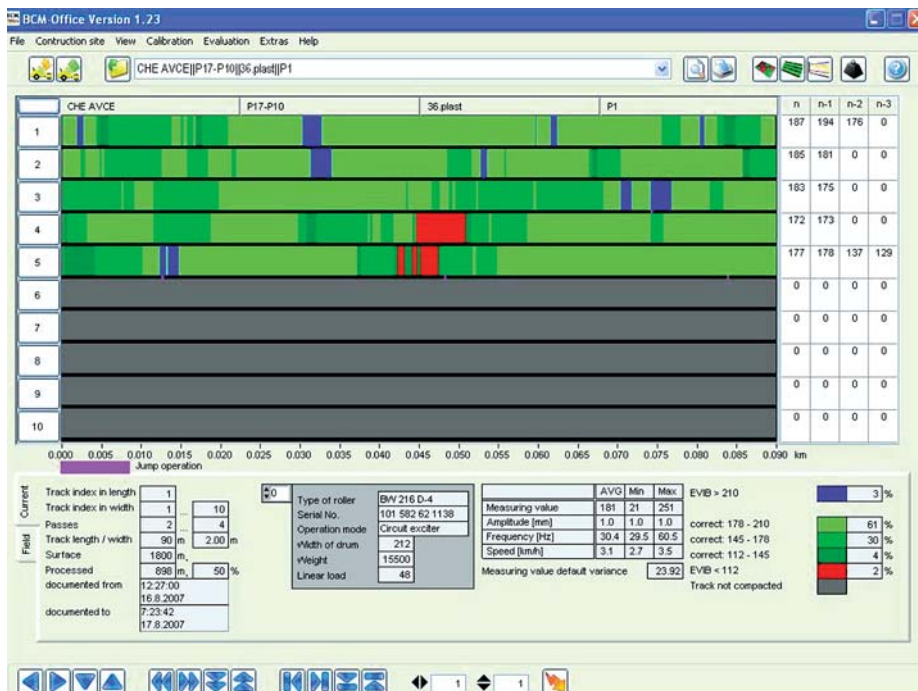
Izkušnje kažejo, da so sesedki nasipov, nadzorovanih s postopki CCC za red velikosti 10- do 30-krat nižji od klasičnih, fliš pri nizkih sukciyah pa ni več podvržen volumskim spremembam. Po temeljitih raziskavah in analizah je bilo sklenjeno, da se fliš lahko vgrajuje v pregradne nasipe pod naslednjimi pogoji:

- za zgoščanje in kontrolo zgoščanja se uporabijo valjarji z vgrajenimi sistemi CCC,
- v nasipe se vgrajujejo navlaženi materiali pri najmanj 85 % saturaciji, kar še zagotavlja dovolj nizko sukucijo,
- kriterij za vrednotenje kakovosti in prevzemanje nasipnih plasti je dinamična merilna vrednost. Med predzadnjim in zadnjim prehodom mora biti razlika v prirastu DMV manjša od 5 %.

Pri doslednem izpolnjevanju kriterijev smo po optimistični prognozi ocenili končno vrednost posedkov na visokih nasipih na 2,4 cm do 7,4 cm, po pesimistični prognozi s klasičnimi postopki pa na 58 cm. Za nadzorovanje vertikalnih in horizontalnih pomikov pregrade smo v času gradnje vzpostavili geotehnični monitoring, ki sicer ni bil predviden v projektu pregradnih nasipov.

3.3 Gradnja in nadzorovanje kakovosti s sistemi CCC

Za gradnjo in nadzorovanje zgoščanja smo uporabili 16-tonski vibracijski valjar BOMAG BW 216 D-4, z delovno širino bandaže



Slika 17 • Izpis stanja podlage v kolesnicah v določeni fazi gradnje

213 cm. Možna je uporaba dveh frekvenc $f_1 = 31$ Hz in $f_2 = 36$ Hz in dveh amplitud, 1,80 in 0,85 mm. Globinski učinek zgoščanja je do 0,8 m, globina merjenja pa je 1,2–1,5 m. Valjar je opremljen z merilnim sistemom Terameter, nadgrajenim s sistemom za celovito obdelavo podatkov Bomag Compaction Management BCM 05.

V obdobju april–maj 2007 smo izvedli štiri poskusna polja za kalibracijo. Največ težav so pri kalibraciji povzročala debela zrna velikosti nad 100 mm, razmočene leče glin in neravnine na površini. Primerjalne meritve smo izvedli s krožno ploščo s lahko padajočo utežjo. Rezultati kalibracije so prikazani na sliki 16. Vrednosti $E_{vd} = 50$ MPa ustreza dinamična



Slika 18 • Pogled na jarek za vgradnjo merilne (inklinacijske) cevi in detekcija cevi pod površino med merilnim prehodom na zaslonu BCM 05

merilna vrednost $E_{vib} = 157,7$ MPa, brez težav pa smo dosegali vrednosti $E_{vib} = 175$ MPa. Tu moramo poudariti, da je za pregradne nasipe najpomembnejši kriterij stopnja zgoščenosti. Zahteva $E_{vd} = 50$ MPa je sicer visoka zahteva, ki pa je prvenstveno namenjena kontroli togosti zaključnih plasti pod prometno obremenjenimi površinami. Naše temeljno vodilo pri gradnji nasipov je bilo zato – ne glede na kalibracijo – zasledovanje kriterija maksimalnega dopustnega prirasta dinamične merilne vrednosti pred zadnjim prehodom za manj kot 5 %.

Z uporabo postopkov CCC smo oba nasipa zgradili v času od junija do septembra leta 2007. Zaradi kratkih časovnih rokov smo nasipe gradili tudi z valjarji brez vgrajenih sistemov CCC, za izvedbo kontrolnih meritev pa uporabljali merilni valjar. V oba nasipa smo vgradili 441.000 m³ materiala, ves material je bil pridobljen v izkopih na lokaciji. Za vrednotenje podatkov smo uporabili nadgrajeni sistem BCM 05. Na sliki 17 je prikazan primer izpisa stanja v času merilnega prehoda. Pomembni so podatki v tabeli na desni strani, ki kažejo na prirast DMV. V kolesnicah so odseki, pobarvani z zeleno, ustrezni, rdeči so slabo zgoščeni, modri pa prekompaktirani odseki. Uporaba BCM 05 omogoča zaznavo najrazličnejših nehomogenosti v podlagi. Na sliki 18 je prikazana detekcija horizontalne cevi, vgrajene za potrebe merjenja vertikalnih pomikov s hidrostatskim inklinometrom. Analiza rezultatov vseh meritev po zaključeni gradnji je pokazala, da so bile povprečne merilne vrednosti na velikem nasipu $E_{vib} = 187$ MPa in na malem nasipu $E_{vib} = 176$ MPa, vse vrednosti so bile v okviru zahtev za prevzem plasti. Pomembno je tudi, da so bili nasipi dokončani septembra 2007 in so tako do začetka gradnje asfaltne obloge v miru počivali in prezimili.

Na sliki 19 je pogled na dograjeni severni, večji nasip, na sliki 20 pa je panorama celotnega bazena z obema dograjenima nasipoma, posneta jeseni 2007.

3.4 Meritve pomikov na nasipih

Deformacije nasipov običajno merimo med gradnjo na mehkih tleh, saj je od hitrosti gradnje in upadanja presežnih pornih tlakov odvisna varnost nasipa, ki je najmanjša med samo gradnjo, nato pa s časom narašča.

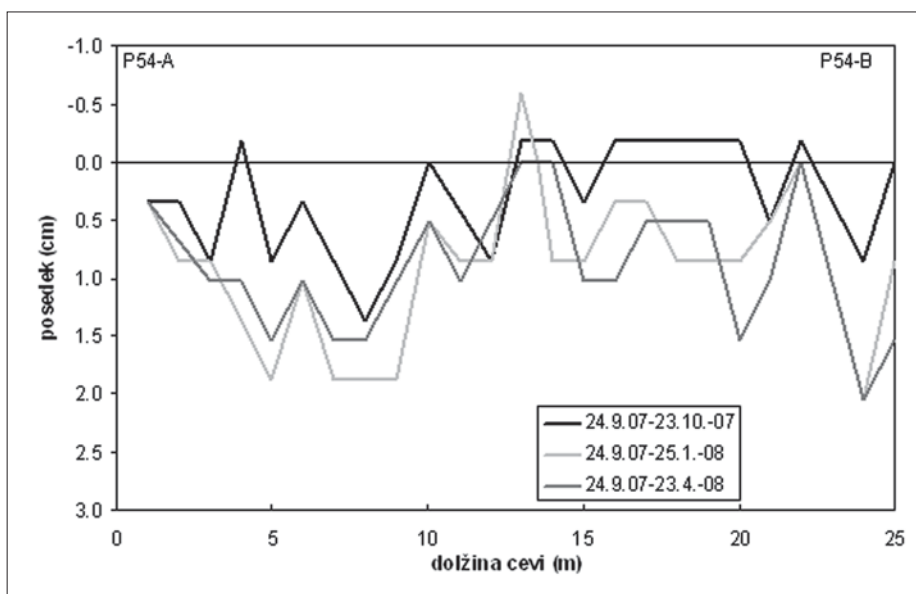
Pregradni nasipi na ČHE Avče pa so temeljeni na trdni, za načrtovane obremenitve »nepodajni« podlagi. Edini posedki, ki se lahko razvijejo v nasipu, so sesedki nasipa, še posebej nevarni pa tisti sesedki, ki bi nastali kot posledica naknadnega razpadanja flišnih zrn,



Slika 19 • Pogled na dograjeni severni nasip, v ozadju Krn



Slika 20 • Panorama bazena med gradnjo jeseni 2007; veliki nasip levo in mali nasip desno zgoraj



Slika 21 • Rezultati meritev vertikalnih pomikov na velikem nasipu v P 54 A prečno na vzdolžno os kažejo, da so na 25 m dolgem opazovanem odseku sesedki minimalni, do 2 cm (ZAG, 2008)

ki tvorijo nosilni skelet. Za funkcionalnost bazena je pomembno, da ne pride do nedopustnih posedkov in diferenčnih posedkov pod asfaltnim tesnilnim slojem. Morebitni nenadni posedki zaradi zakrasede podlage, pred katerimi se je sicer težko, a možno zavarovati, možnost dogodka pa je na ČHE Avče realno prisotna, niso predmet naše obravnave, zato

se bomo osredotočili le na deformacijsko obnašanje samih nasipov.

Za nadzorovanje vertikalnih in horizontalnih pomikov smo v nasipe med gradnjo vgradili dva horizontalna in en vertikalni inklinometer ter več posedalnih plošč. Meritve v inklinometrih je izvajal Zavod za gradbeništvo Slovenije, meritve na posedalnih ploščah

pa geodetska služba Primorja. Vsi rezultati meritev kažejo, da so vertikalni pomiki v višini pod krono v prvem letu po izgradnji minimalni, ca. 2 cm, in celo manjši od predhodne optimistične prognoze 2,4–7 cm (slika 21), pomiki v horizontalni smeri, merjeni v vertikalnem inklinometru, pa v redu napake meritve ± 3 cm.

4 • RAZPRAVA

4.1 Zvezna kontrola zgoščanja proti klasičnim postopkom kontrole

Klasični postopki za nadzorovanje kakovosti zgoščanja zemljine ali zdrobljene kamnine v nasipno plast obsegajo dve glavni skupini meritev, in sicer:

- Meritve gostote in vlage materiala v vgrajeni plasti in nato izračun relativne zgoščenosti (DPR) glede na referenčno gostoto, določeno v laboratoriju po Proctorjevem postopku. Za merjenje gostote nasipnih plasti se pri nas največ uporabljajo izotopske sonde in kalibrirani cilindri, redkeje pa tudi nadomestni postopki s peskom ali vodo. Kontrole zgoščenosti nasipov z uporabo penetracijskih sond se v Sloveniji niso prijele, čeprav so v svetu – še zlasti v urbanih sredinah – dokaj pogoste.
- Meritve deformacijskih modulov plasti (E_{v1} , E_{v2} , E_{vd} , M_E , M_S) z uporabo statične in dinamične krožne plošče. V to skupino meritev lahko uvrstimo tudi meritve nosilnosti (CBR) in meritve modula reakcije tal (k_s), ki pa se v Sloveniji izvajajo zelo redko.

Vse naštetje metode so točkovne. Tehnik postavi merilni instrument na statistično ali predhodno naključno izbrana mesta na nasipni plasti in opravi meritve. Najpogostejše so meritve z izotopsko sondo v obsegu približno 1 meritev/200 m³, kar pomeni v primeru gradnje 0,5 m debele plasti po eno meritev na 400 m². Rezultat meritve je omejen tudi po višini. Globina dosega krožne plošče je približno 1,5-kratnik premera plošče in je pri plošči premera 30 cm okoli 45 cm. Z nadomestnimi postopki merjenja gostote le redko presežemo globino 20 cm.

Za vrednotenje zgoščenosti potrebujemo še posrednika – referenčno vrednost, ki jo za uporabljeni material določamo po Proctorju v laboratoriju. Medlaboratorijske primerjave kažejo (Ločniškar et al, 2008), da je primerljivost in ponovljivost določanja referenčne gostote po Proctorju zelo slaba, kar pomeni,

da je statistično ovrednotena zgoščenost zelo odvisna od tega, v katerem laboratoriju so bile referenčne raziskave opravljene. Tudi slabih mest ali zveznih polj šibkosti v nasipu s klasičnimi meritvami ni možno prepoznati. Če se na objektu pojavijo poškodbe, statistika takih rezultatov ne pomaga pri odkrivanju vzrokov.

Pri postopkih CCC je bandaža delovnega stroja hkrati tudi merilna naprava, ki meri vzdolž kolesnice ves čas obratovanja stroja. Strojnik med valjanjem sproti ocenjuje učinkovitost valjanja, opazuje polja šibkih mest, kjer valjanje samo po sebi ne zadošča, in so potrebni obsežnejši sanacijski ukrepi, hkrati pa se lahko izogne prekomernemu valjanju.

Postopki CCC so tudi pomemben kazalnik stanja temeljnih tal in podlage, ki ga klasični postopki ne prepoznajo. Na sliki 22 je prikazan primer gradnje pobočnega avtocestnega nasipa pri Dolgi vasi. Nov nasip iz gramozna se prislanja na stari nasip, zgrajen iz mešanega glinasto-grušnatnega materiala. Na poljih, označenih s števkami 1, 2 in 3, je gramozni nasip visok, na poljih, označenih s števkama 4 in 5, pa nizek. Točkovni preizkusi z dinamično ploščo so na vseh poljih izkazali ustrezno togost, CCC pa je na polju 4 zaznal vplive slabe podlage (slika 23), ki bi se v primeru, če bi bil to že zaključni planum nasipa, kasneje prenašale navzgor, na vozišče in prispevale k prehitremu utrujanju asfalta in prezgodnjim poškodbam vozišča. Zvezna kontrola zgoščanja ima številne prednosti pred klasičnimi točkovnimi metodami. Postopki CCC niso uporabni le na velikih



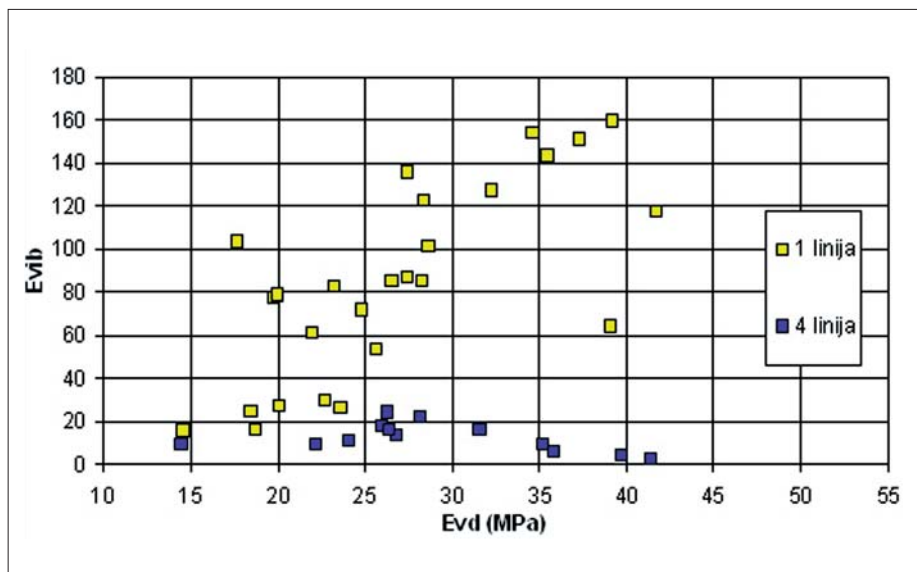
Slika 22 • Poskusna polja na avtocestnih nasipih pri Dolgi vasi, marec 2007

gradbiščih. Uporabljamo jih lahko tudi na manjših gradbiščih, pri odkrivanju slabo zasutih kanalov pod cesto, pri ugotavljanju slabih mest na nasipih po spomladanski odjugi ali po vodnih ujmah, pri ugotavljanju prevelikih vplivov slabe podlage na nizkih nasipih in podobno. Prednosti niso le v boljše nadzorovani in boljši kakovosti zgoščanja. Z uporabo CCC se skrajša čas gradnje in nenazadnje se izboljša raba stroja in zmanjša poraba goriva.

4.2 Postopki CCC ne ogrožajo delovnih mest

Po začetku gradnje avtocest se je v Sloveniji zelo povečalo število laboratorijev za kontrolo kakovosti zemeljskih del, v katerih je zaposlenih pomembno število inženirjev in tehnikov-tehnologov, katerih primarna dejavnost je usmerjena na izvajanje točkovnih meritev za potrjevanje kakovosti. Ali so morda z uvajanjem postopkov CCC ogrožena delovna mesta?

Zatrdimo lahko, da postopki CCC ne ogrožajo delovnih mest. Nasprotno, od vseh, ki sodelujejo pri gradnji, zahtevajo več znanja, širine in usposobljenosti, tako pri strojnikih, ki stroj upravljajo, kot pri tehnologih in nadzornikih, ki preverjajo kakovost, potrjujejo rezultate ter prevzemajo plasti.



Slika 23 • Rezultati primerjalnih meritev s CCC (E_{vib}) in krožno ploščo (E_{vd}) pri Dolgi vasi

Na tem mestu moramo še prav posebej poudariti pomen ustrezno usposobljenega strojnika na valjarju z vgrajenim sistemom CCC. Po naših opažanjih je le malo strojnikov dobro usposobljenih za delo na valjarjih. Od strojnika, ki komajda obvladuje valjar, ne moremo

pričakovati, da bo obvladoval valjar in sistem CCC. Uvajanje rabe postopkov CCC bo treba podpreti tudi z ustrežno politiko zaposlovanja in upravljanja s kadri na gradbiščih ter izpopolnjevanjem tako v izvajalskih podjetjih kot tudi v institucijah nadzora.

5 • SKLEP

Nasipi so pomembni inženirski objekti, ki pa morajo živeti v senci atraktivnejših bratov: viaduktov, visokih betonskih pregrad, sodobnih vozišč, luških pomolov itd. Svojevrsten paradoks je, da moramo v času, ko se na vseh področjih uvajajo novi in »boljši« materialni, v nasipe vgrajevati vse slabše materiale, saj so kvalitetni postali nedostopni ali predragi. Funkcionalne zahteve pa naraščajo. Postopki CCC pomenijo velikanski napredek na področju celovitega obvladovanja gradnje nasipov in vseh

tistih plasti, ki jih gradimo po načelu nasipov. Na primeru gradnje pregradnih nasipov za akumulacijo ČHE Avče smo pokazali izjemne rezultate, dosežene na flišnem materialu, ki ga sprva projektant ni dovolil vgrajevati v nasipe zaradi strahu pred prevelikimi deformacijami. Postopki CCC so v nekaterih primerih tudi edini resnično merodajni kazalnik stanja zgoščenosti, zato bi morali njihovo rabo spodbujati na vseh ravneh odločanja. V času nastajanja tega članka so v gradnji

veliki, do 40 m visoki avtocestni nasipi na odsekih avtoceste Ponikva–Pluska in Ponikva–Hrastje. Načrtujejo se nove hidrotehnične gradnje, rekonstrukcije železnic, zgraditi bo treba pokrove na desetinah slovenskih odlagališč odpadkov in rudniških jalovišč. V številnih slovenskih gradbenih podjetjih imajo valjarje z vgrajenimi sistemi CCC že nekaj let, a so zadržani do njihove rabe. Upamo, da bo članek prispeval k pospešeni rabi teh postopkov na vseh področjih zemeljskih del. Če smo se še pred nekaj leti izgovarjali, da ni ustreznih navodil, tehničnih specifikacij, znanj ali izkušenj za rabo postopkov CCC, takih zadržkov danes ni več.

6 • ZAHVALA

Testiranje opreme in izvedbo obsežnih poskusnih polj na gradbiščih avtoceste pri Dolgi vasi je omogočil DARS preko strokovnih služb pri DDC. Dars je pokrival tudi

stroške dvodnevne delavnice na UL FGG v maju 2007 in svetovalne usluge dr. Adama iz TU na Dunaju. Predstavniki HSE in SENG so dovolili poskusno rabo in nato potrdili

redno rabo postopkov CCC na gradbišču ČHE Avče. Vsem imenovanim se avtorji zahvaljujejo.

7 • LITERATURA

- Adam, D., Continuous Compaction Control, Interno gradivo na delavnici, UL FGG Ljubljana, Katedra za mehaniko tal, maj 2007.
- Adam, D., Kopf, F., Sophisticated compaction technologies and continuous compaction control, V: *Compaction of Soils and Granular Materials*, Ecole nationale des ponts et chaussées, Paris, 19. maj 2000, 207–221, 2000.
- Adam, D., Kopf, F., Theoretical analysis of dynamically loaded soils, V: *Compaction of Soils and Granular Materials*, Ecole nationale des ponts et chaussées, Paris, 19. maj 2000, 3–17, ISSMGE/ETC 11, 2000.
- Brandl, H., Adam, D., Roller integrated Continuous Compaction Control in Road and Railway Engineering, V: *Megra*, 2006, Gradnja avtocest v Pomurju, Zbornik referatov, Gornja Radgona, 5. april, 2006, DRC, 44–55, 2006.
- Brandl, H., Low embankments on soft soil for highways and high speed trains, V: *Correia, A.G., Brandl, H. (ur.), Geotechnics for Roads, Railtracks and Earth structures*, Tokyo, A. A. Balkema, 239–259, 2001.
- Floss, R., Kloubert, H. J., Newest developments in compaction technology, V: *Compaction of Soils and Granular Materials*, Ecole nationale des ponts et chaussées, Paris, 19. maj 2000, 247–261, 2000.
- ISSMGE-TC 3, Roller Integrated continuous compaction control, Technical contractual provisions – recommendations, 16 ICSMGE, 2005, Osaka, 2005.
- Ločniškar, A., Bebar, M., Erbežnik, C., Zrim, S., Petkovšek, A., Vloga in dosežki komisije za zemeljska dela pri izgradnji avtocest v Sloveniji, V: *Logar, J., Petkovšek, A., Klopčič, J. (ur.), 5. posvetovanje slovenskih geotehnikov*, Nova Gorica, 12.–14. junij 2008, Slovensko geotehniško društvo, 119–133, 2008.
- Merkblatt über flachendeckende dynamische Verfahren zur Prufung der Verdichtung im Erdbau, FGSV, Koln 1993.
- Petkovšek, A., Kontinuirana kontrola zgoščanja pri gradnji nasipov – začetne slovenske izkušnje z uporabo kompaktoetra, V: *VILHAR, M. (ur.), 6. slovenski kongres o cestah in prometu*, Portorož, 253–262, 2002.
- Petkovšek, A., Maček, M., Jurjavčič, P., Majes, B., Uporaba valjarjev v vgrajenim sistemom za kontinuirano kontrolo zgoščanja. Razvojno aplikativni projekt, Naročnik DARS, E 39/07 UL FGG Ljubljana, 54, 2007.
- Petkovšek, A., Majes, B., Izkušnje z geotehničnimi problemi pri gradnji avtocestnega omrežja: je bila odločitev o gradnji visokih nasipov iz fliša na HC Selo–Šempeter pravilna? V: *Žlender, B., Dolinar, B. (ur.), 2. Šukljetovi dnevi*, 19. 10. 2001, Maribor, Zbornik referatov, Slovensko geotehniško društvo, 31–38, 2001.
- Quibel, A. et al., Le Portancemètre: Un Nouvel Appareil d'asculation en Continu des Couches de Forme et de la Partie Supérieure des Terrassements, CETE, 1998.
- RVS 8S.02.6, Erdarbeiten, Kontinuierlicher walzenintegrierter Verdichtungsnachweis, OFS, Dunaj, 1999.
- Seed, G. H. B., Duncan, J. M., The failure of Teton Dam, Eng. Geology, Elsevier, 173–205, 1987.
- Sylvester, A. G., Teton dam failure. http://www.geol.ucsb.edu/faculty/sylvester/Teton%20Dam/welcome_dam.html, julij 2008.
- Turner, H. F., Sandstrom, A. J., Continuous Compaction Control, V: *Compaction of Soils and Granular Materials*, Ecole nationale des ponts et chaussées, Paris, 19. maj 2000, 237–246, 2000.
- TSC 06.713:2005, Meritve gostote, Postopki kontinuiranih površinskih dinamičnih meritev, Ministrstvo za promet Republike Slovenije.
- ZAG Ljubljana, 2. redno poročilo o meritvah posedanja v profilu na bazenu ČHE Avče, P 585/05-710-19, 13, 2008.