

Nove možnosti z izboljšano opremo za preskušanje bentonitne peščene mešanice

New Possibilities with Improved Green Sand Testing Facilities

Izvleček

Kakovost form iz svežega peska je poglavitna za kakovost ulitka in zmanjšanje površinskih napak. V večini industrijskih okolij se še vedno uporabljajo ročno vodeni stroji, katerih zasnova je iz prejšnjega stoletja. Medtem ko omogočajo te zastarele naprave ohranjati kakovost v livarni, se z njimi ne dobi novih dodatnih informacij o kakovosti bentonitne peščene mešanice. Ta prispevek bo dal informacije o razvoju nove opreme za preskušanje zgoščevanja in stiskanja bentonitnih peščenih mešanic, preskušanje trdnosti mokrih peskov, ki daje primerjavo z vrednostmi, ki se dobijo z ročno vodenimi stroji. V okviru predstavitve bomo vpeljali pojme iz zrnastostnih sistemov za obnašanje bentonitnih peščenih mešanic.

Abstract

The quality of green sand moulds is paramount for the casting quality and reduction of surface defects. In most industrial environments hand driven machines which concepts were developed in the last century are still used. While these old fashioned apparatuses can help to maintain quality in a foundry no new additional information on the green sand quality will be obtained. This presentation will give information on the development of novel green sand testing facilities for compaction, pressure, as well as wet strength testing and gives comparison to values obtained by manually operated machines. Within the presentation concepts for granular systems will be introduced for the behaviour of green sands.

1 Uvod

Splošno znanje v livarnah o lastnostih bentonitne peščene mešanice in njegovem vplivu na obnašanje livarskih napak se je običutno zmanjšalo z uporabo zunanjega preskušanja peskov in zaradi zunanjih svetovalcev. Poleg tega je malo ali vsaj premalo raziskav v okviru univerz, ki bi financirale pomembne študije o lastnostih bentonitnih peščenih mešanic. Ne poudarja se dovolj, da je večina livarskih napak pri litju v pesek povezana z nezadostnim

1 Introduction

The general knowledge within foundries on green sand properties and its influence on casting defect behaviour has significantly decreased as a result of external sand testing and dependence of external consultants. Moreover even within University research little or too few research has been performed to attract funding for significant studies on green sand properties. It cannot be stressed enough that in sand casting the majority of casting defect can be related to

upravljanjem s bentonitno peščeno mešanico. Zadnje raziskave in razvoj so podpirali le dobavitelji livarske industrije z glavnim poudarkom na anorganskih sistemih veziv na osnovi vodnega stekla in zmanjšanju fenolnih vezivnih sredstev v organskih vezivih zaradi zmanjšanja emisij in neprijetnih vonjav, ki pa na drugi strani povečujejo tekočnost peska ali trdnost forme.

Ves ta pozitiven razvoj je bil dosežen z zelo zastarelo, ročno upravljano opremo za preskušanje peskov in zanemarjal se je razvoj natančnejše opreme za preskušanje peskov. Te ročno upravljane preskuševalne naprave še vedno predstavljajo dejansko stanje na tem področju. Da bi izboljšali lastnosti bentonitnih peščenih mešanic in razumeli njihovo obnašanje, je razvoj novih preiskovalnih metod bistven. Skoraj istočasno in vzporedno je potekal razvoj navpične preiskovalne naprave na IFG-inštitutu v Düsseldorfu [1] v sodelovanju s podjetjem Jung Instruments GmbH in vodoravne preiskovalne naprave na Danski tehnični univerzi DTU [2,3,4] v okviru doktorskega raziskovalnega dela.

Za klasično preskušanje bentonitnih peščenih mešanic so se uporabili vzorci bentonitne peščene mešanice, ki so bili stisnjeni s tremi udarci in imeli geometrijo $\varnothing 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$. Nato se je z ročno upravljano ročico ali pri modernejših napravah z ročico, ki jo nastavlja električni servomotor, nastavilo preskušanje trdnosti s tlakom, strigom, dvojnimi strigom, s cepljenjem, natezne trdnosti in natezne trdnosti v mokrem. Za posamezne naloge se uporabljajo posebni vložki. Za zelo občutljive preskuse v mokrem ali preskušanje s stiskanjem se uporabljajo ločene naprave. Slabosti teh metod preskušanja je ročno upravljanje, ki je odvisno od upravljalca in v vseh primerih vizualno odčitavanje rezultatov, ki ne omogoča neposrednega

an insufficient green sand management. Recent research and development has been only supported by suppliers of the foundry industry, however, with a major emphasis on anorganic water glass binder systems and the reduction of phenolic binder in organic binders to reduce emission and unpleasant smells while simultaneously increasing e.g. fluidity or strength.

All these positive developments were mainly performed with very old fashioned manually driven sand testing equipment and a significant aspect of the development of more accurate sand testing equipment was neglected. Nevertheless these manually driven sand testing apparatuses still represent state of the art sand testing equipment. In order to improve green sand properties and its understanding thereof it is essential to develop new testing methods. Nearly simultaneously parallel development ensued for a vertical testing machine at the IFG Institute in Düsseldorf [1] in collaboration with the company Jung Instruments GmbH and of a horizontal testing machine at the Technical University of Denmark DTU [2,3,4] within a PhD research work.

Conventional green sand testing is on samples which are compacted with 3 impacts to a standardised geometry of a $\varnothing 50 \times 50 \text{ mm}$ green sand body. Subsequently green-compression, - shear, - double-shear, -splitting-strength, - tensile, - wet-tensile testing is on a testing apparatus with manual driven crank or in modern(ised) machines by a geared electric servomotor. Special inserts are used to adapt for the testing tasks. For the extreme sensitive wet tensile test or the compaction test separate testing machines are used. The disadvantages of these testing procedures are that manual driven testing equipment is user dependent and that in all cases measurement is by a visual read out via a friction dial which does not permit direct feeding of the data

vnašanja teh v elektronski sistem kakovosti. Poleg tega ne omogoča risanja krivulj sila-pomik kot pri klasičnem preskušanju materialov, niti se dobljeni rezultati ne morejo uporabiti v znanstvene namene, kot je simulacija mehanskega obnašanja forme iz svežega peska z metodo končnih elementov.

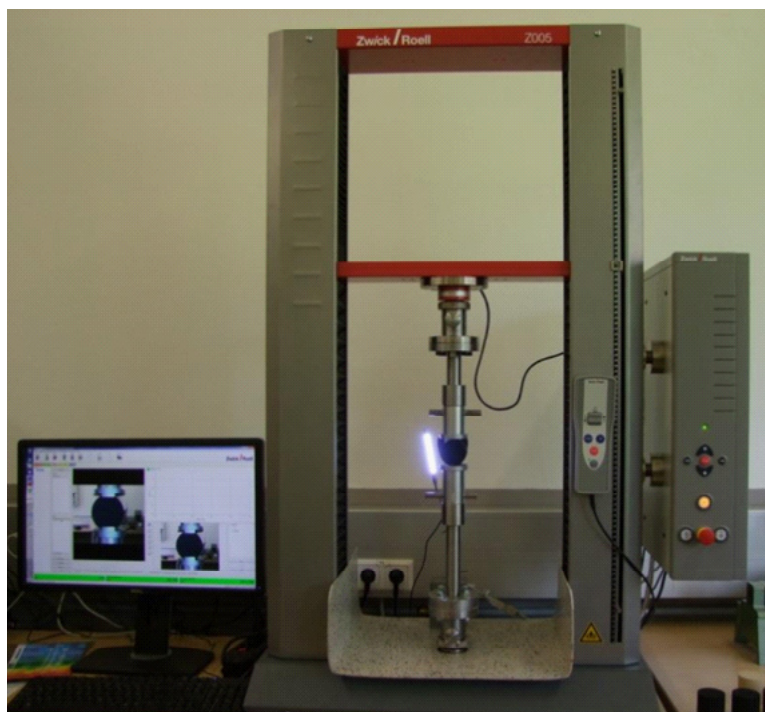
Te pomanjkljivosti so pripeljale do razvoja navpičnih naprav za preskušanje peska z risanjem diagramov sila – premik. Preskušanje natezne trdnosti peskov je težavno, ker so sile pri tem preskušanju zelo majhne v primerjavi s silami v kovinah. Zato ostaja, da se razišče, če preje odkrite prehodne cone na začetku krivulj sila – premik predstavljajo odziv obremenjenega svežega peska, ali če je treba razviti natančnejše postopke preskušanja.

V nadaljevanju bomo predstavili razvoj modernih metod preskušanja svežega

into an electronic quality system. Moreover, no force-displacement curves such as in the classical material testing equipment are obtained and the obtained data cannot be used for scientific purposes such as in finite element simulation of the mechanical behaviour for green sand moulds.

It is these disadvantages which led to the first developments of a vertical sand testing machine which force-displacement plots. Tensile testing of green sands is difficult to perform as the forces present are very small compared to those of metals. Therefore, it remains to be explored if the earlier detected transition zones at the beginning of force displacement curves are a response of the green sand under load or if a more accurate testing procedure needs to be developed.

In the following sections results of the development of modern sand testing



Slika 1: Univerzalni stroj za preskušanje svežih peskov (Zwick Z005)

Figure 1: Universal green sand testing machine (Zwick Z005).

peska z upoštevanjem modernih metod zgoščevanja z udarci in jih primerjali s klasičnim ročno vodenim preskušanjem industrijskih bentonitnih peščenih mešanic.

2 Preskusne metode

2.1 Univerzalni stroj za preskušanje peskov

V primerjavi s kovinskimi materiali so za preskušanje bentonitne peščene mešanice potrebne zelo majhne sile. V primeru nateznega preskušanja mokrega peska so sile lahko le 5-10 N, kar pomeni, da je treba zelo paziti, da se dobijo ponovljivi rezultati. Zato so potrebne zelo občutljive in natančne obremenitvene celice, ki dovoljujejo visoko frekvenco meritev, da se izdelajo občutljive krivulje sila – premik vzorcev peščenih form iz svežega peska. V splošnem se od moderne opreme za preskušanje bentonitnih peščenih mešanic pričakuje naslednje:

- velika frekvenca meritev in dovolj velik RAM
- sprotno (on-line) zasledovanje krivulj sila – premik
- uporabniku prilagojeno programiranje
- obremenitvene celice z visoko ločljivostjo, da se olajšajo meritve natezne trdnosti v mokrem
- prilagodljiva elektronska dokumentacija rezultatov in predstavitev
- vgradnja v sisteme za zagotavljanje kakovosti

Zaradi takih zahtev se uporabljajo posebni univerzalni preskuševalni stroji, kot je naš uporabljeni Zwick Z005, ki omogočajo veliko stopnjo prostosti pri majhnih preskuševalnih obremenitvah. Za ta preskuševalni stroj smo prilagodili klasične vložke, podobne tistim kot pri ročno vodenih strojih, kar kaže slika 2. Posebna pozornost

methods taking into account modern impact compaction methods will be presented in comparison to classical manual testing equipment for industrial green sands.

2 Experimental Methods

2.1 Universal Sand testing machine

In comparison to metallic material only very small forces are required for the testing of green sand. In the case of the wet tensile test the forces can be as low as 5-10 N which emphasis the care which is required to achieve reproducible results. Therefore extreme sensitive and precise load cells permitting a high measurement frequency are required to measure the sensitive force-distance curves of the weak and brittle granular material behaviour of green sand mould samples. Overall the following requirements exist for a modern sand testing facility:

- High measurement frequency and sufficient RAM
- Observation of force-distance curves online
- Flexible programming for the user
- Load cell with high resolution to facilitate wet tensile strength measurements
- Flexible electronic documentation of results and their representation
- Incorporation into quality assurance systems

Based on these requirements only high end universal testing machines such as the Zwick Z005 machines used here give this degree of freedom for small testing loads. For this universal testing machine conventional inserts similar to those existing in manual testing were adapted, see figure 2. Special care was taken to facilitate measurements within the symmetry axis of samples and that as little as possible alignment of the

je bila posvečena, da so bile lahko meritve izvedene z vzorci obstoječe simetrije in da se je vzorec čim manj prilagajal uporabljeni sili. Posebno natezni preskus v mokrem je zahteval posebno prilagoditev majhnim pričakovanim silam in dodatni uporabljeni toploti za posnemanje kondenzacijske cone v bentonitni peščeni mešanici. Za stroj Zwick Z005 je bil razvit poseben nosilec za proporcionalno-integralno-diferencialno (PID) krmiljen vir toplote (slika 1), da se olajša natezni preskus vzorcev svežih peskov v mokrem. Dodatno je bila nameščena povezava z video kamero, da se med preskušanjem lahko opazovalo obnašanje vzorcev svežega peska.

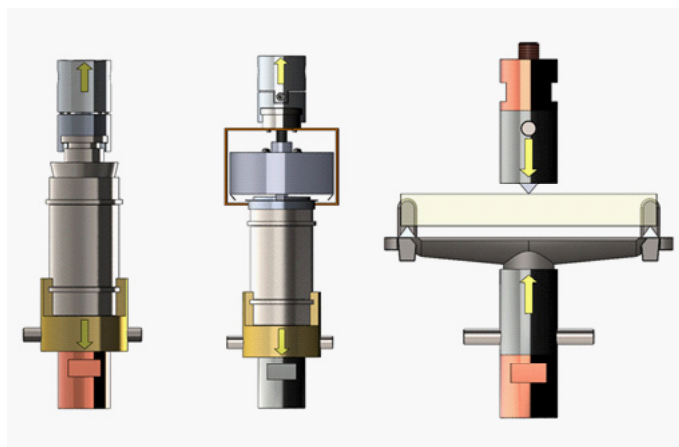
2.2 Mešanica svežega peska

Mešanice po 20 kg svežega peska so bile pripravljene z dvoosnim mešalnikom (Kollergang, Simpson). Njihove sestave so v razpredelnici 1. Sestavine so bile ločeno stehane in dodane v mešalnik. V osnovi so mešanice vsebovale različne deleže bentonita in vode, da so se dosegli različni trdnostni nivoji za nadaljnje preskušanje s klasičnimi ročno vodenimi in modernimi napravami, kot je univerzalni stroj Zwick Z005. Peščenim mešanici se je

sample to the applied force was observed. In particular the wet tensile test required special adaption to the low expected forces and the additional heat involved to mimic the condensation zone in green sand. A special holder was developed by Zwick Z005 (see figure 1) with a PID controlled heat source to facilitate wet tensile testing of green sand samples. Additionally a link to video camera was installed to see the overall behaviour of the tested green sand samples online.

2.2 Green Sand Mixture

Greensand mixtures of each 20 kg were produced by double shaft edge mixer (Kollergang, Simpson) which composition is seen in table 1. Components were individually weight and added to the mixer. Principally, the mixtures contain different bentonite and water content to obtain different strength levels in subsequent testing on the classical hand driven and newly developed sand testing on the universal testing machine by Zwick (Z005). The sand mixtures were kept without given rise to excessive drying. For this purpose bags within plastic containers with tight lids were used.



Slika 2: Vložki za preskušanje svežega peska na tlak, strig, dvojni strig, razkol, na nateg, nateg v mokrem in upogib

Figure 2: Green sand testing inserts for compression, shear, double shear, splitting, tensile, wet tensile and bending strength measurements

Razpredelnica 1: Mešanice po 20 kg svežega peska in dodatkov**Table 1:** Green sand mixtures and additives

za vsakih 20 kg / of each 20 kg	voda / water [%]	bentonit / bentonite [%]	premogov prah / coal dust [%]	voda / water [kg]	bentonit / bentonite [kg]	premogov prah / coal dust [kg]
mešanica 1 / mixture 1	3,00	6,50	--	0,60	1,30	--
mešanica 1 / mixture 2	5,00	6,50	--	1,00	1,30	--
mešanica 3 / mixture 3	4,00	5,00	--	0,80	1,00	
mešanica 3 + C/ mixture 3 + C	4,00	5,00	3,00	0,80	1,00	0,60
mešanica 4 / mixture 4	4,00	8,00	--	0,80	1,60	--
mešanica 4 + C / mixture 4 + C	4,00	8,00	3,00	0,80	1,60	0,60

preprečevalo čezmerno sušenje. Za to so se uporabile plastične posode s tesnimi pokrovi.

3 Rezultati

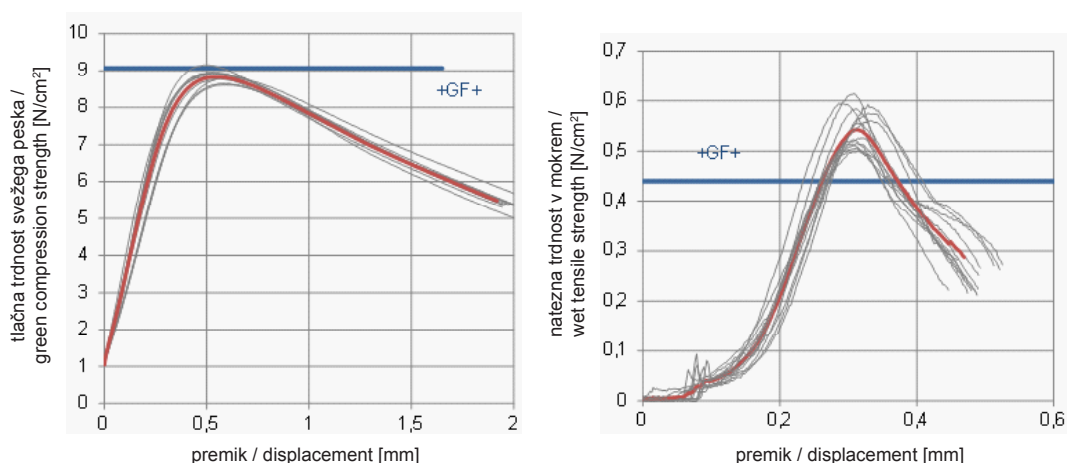
Za primerjavo nove preskuševalne metode s klasičnimi ročnimi preskusi je bilo narejenih vsaj 10 preskušanj z vsako metodo na vsakem preskusnem stroju z vzorci vsake mešanice peskov. A natezni preskusi so bili narejeni le na univerzalnem preskusnem stroju. Obsežno ovrednotenje povprečnih vrednosti in standardnih deviacij tlačne, cepilne, natezne trdnosti svežega peska in natezne trdnosti v mokrem, preskusov z dvojnim strigom na obeh strojih, z ročnim vodenjem in na univerzalnem stroju, prikazuje razpredelnica 2. Najvišja vrednost na univerzalnem stroju je bila izbrana za primerjanje s klasično metodo. Najvišje izmerjene vrednosti na univerzalnem stroju so bile v okviru standardnih deviacij tako pri klasični kot pri novi metodi preskušanja. Jasno se vidi, da so pri novi metodi manjše standardne deviacije kot pri klasični metodi pri vseh preskušanih peskih in vseh preskuševalnih metodah. Najbolj

3 Results

For a comparison of the new testing method to the conventional manual tests at least 10 samples of each sand mixture were tested for each testing machine and method. However the green sand tensile tests were only measured on the universal testing machine. Extensive evaluation of the mean value and standard deviation can be seen in table 2 for the compression, splitting strength, green tensile, wet tensile and double shear tests for both conventional hand driven and universal testing apparatuses. For the universal testing apparatus the maximum value was chosen for comparison to the classical method. The maximum values measured on the universal testing method are within the standard deviations of both the classical and new testing method. As a clear trend the new method shows a smaller standard deviation compared to the classical method for all sand mixtures and testing methods investigated. Most importantly measurements on the universal testing machines give force-displacement or strength-displacement curves respectively. In figure 3 a and 3b are shown the green-

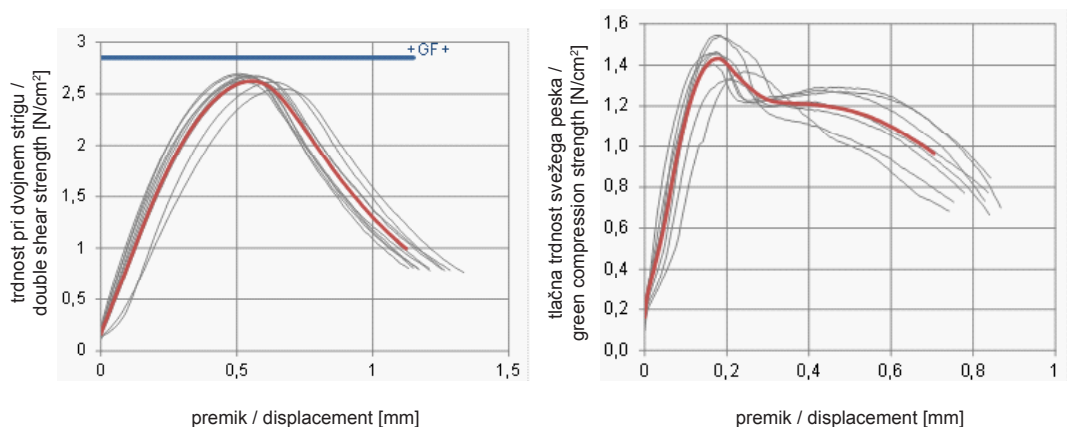
pomembno je, da se z univerzalnim strojem dobijo krivulje sila – premik odnosno trdnost – raztezek. Sliki 3 a in 3 b kažeta krivulje sila – premik za tlačni preskus s svežim peskom, preskus z dvojnim strigom, natezni preskus s svežim peskom in natezni preskus v mokrem. Dodatno sta srednja vrednost in standardna deviacija klasično izmerjenih vrednosti prikazani v modrem in označeni z »+GF+« glede na uporabljeni klasični

compression, double-shear, green-tensile and wet tensile strength - displacement curves. Additionally the mean value and the standard deviation of the conventionally measured data are shown in blue, marked "+GF+", with respect to the used conventional testing apparatus. For each measuring method the curves show a closely bunched bundle of curves which exhibit a nearly common maximum point



Slika 3a: Tlačna trdnost svežega peska in natezna trdnost v mokrem

Figure 3a: Green compression and wet tensile strength



Slika 3b: Trdnost svežega peska pri dvojnem strigu in natezna trdnost

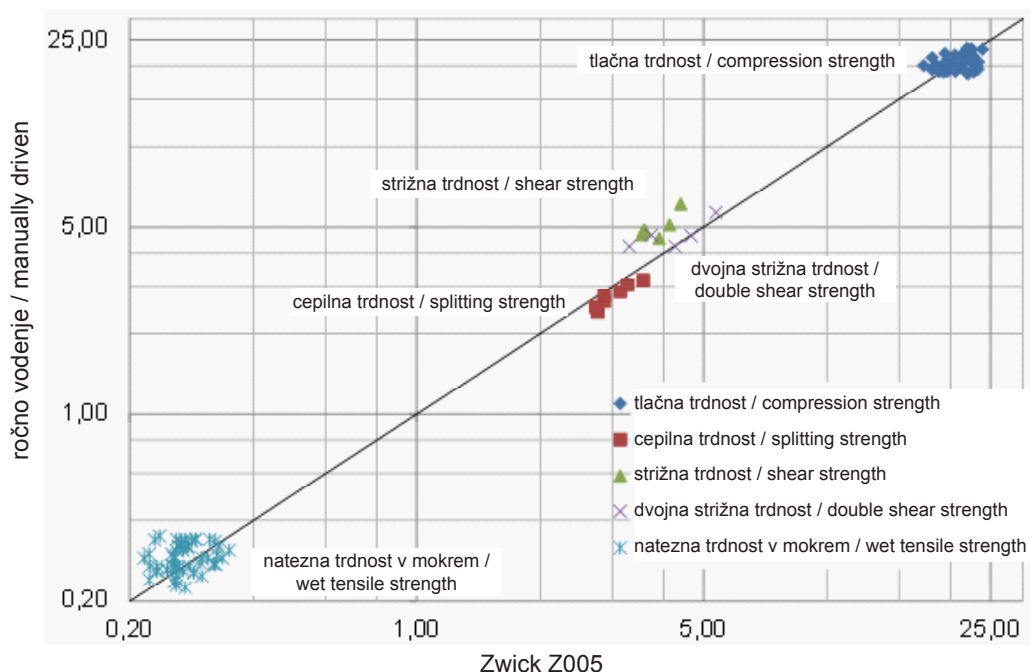
Figure 3b: Green double shear and tensile tensile strength

preskuševalni stroj. Pri vsaki merilni metodi so krivulje kot snop krivulj, ki imajo skoraj skupno najvišjo vrednost, ki dobro ustreza standardni deviaciji vrednosti, ki se je dobila s klasično metodo. Treba je poudariti, da so natezni preskusi v mokrem najbolj občutljiva metoda preskušanja. Posebno pozornost je treba posvetiti umerjanju klasičnih strojev za natezne preskuse v mokrem. Ko smo to naredili, se lahko dosežejo zadovoljivo ponovljivi rezultati, ki dovolj dobro ustrezajo rezultatom na univerzalnem preskuševalnem stroju.

Vse rezultate preskušanja svežih peskov lahko vidimo na diagramu na sliki 4, ki zajema tako klasične ročno vodene metode kot metode univerzalnega

which corresponds well within the standard deviation to the value obtained by the classical method. It is to point out that the wet tensile tests represent the most sensible testing method. Particular attention must be paid to the calibration of the conventional wet tensile test machines. Once this has been performed satisfactory reproducible results can be achieved which correspond well to that of the values obtained by the universal testing machine.

The overall results of the green sand testing can be visualized by plot of the values obtained of both conventional hand driven and universal testing methods seen in figure 4. Small deviations can only be seen for the sensitive wet tensile test in



Slika 4: Primerjava trdnostnih vrednosti, dobljenih z ročno vodenim in z univerzalnim preskuševalnim strojem

Figure 4: Comparison of manual driven and on a universal testing machine obtained strength values

Razpredelnica 2: Povprečne vrednosti trdnosti svežega peska in standardna deviacija za različne metode preskušanja peščenih mešanic, opisane v razpredelnici 1

Table 2: Green sand strength mean values and standard deviation for different testing methods of sand mixture described in table 1

meritev / measurement			tlačna trdnost / compressive strength [N/cm ²]	cepilna trdnost / splitting strength [N/cm ²]	natezna trdnost bentonitne peščene mešanice / green tensile strength [N/cm ²]	natezna trdnost v mokrem / wet tensile strength [N/cm ²]	dvojna strižna trdnost / double shear strength [N/cm ²]
M 1	klasično / conventional		6,63	1,19	-	0,32	1,95
		s	0,25	0,06	-	0,01	0,06
	Zwick		6,47	1,22	1,12	0,35	1,92
		s	0,18	0,03	0,14	0,01	0,07
M 2	klasično / conventional		5,92	1,04	-	0,35	1,79
		s	0,09	0,05	-	0,01	0,03
	Zwick		5,85	1,11	0,99	0,41	1,73
		s	0,07	0,01	0,02	0,02	0,02
M 3	klasično / conventional		4,76	0,73	-	0,27	1,33
		s	0,10	0,07	-	0,03	0,05
	Zwick		4,58	0,83	0,75	0,32	1,10
		s	0,08	0,01	0,01	0,02	0,03
M 3+C	klasično / conventional		5,82	0,84	-	0,26	1,58
		s	0,06	0,05	-	0,01	0,04
	Zwick		5,59	0,99	0,89	0,39	1,53
		s	0,10	0,02	0,03	0,01	0,03
M 4	klasično / conventional		7,93	1,37	-	0,41	2,44
		s	0,12	0,05	-	0,01	0,06
	Zwick		7,82	1,51	1,42	0,53	2,26
		s	0,12	0,02	0,04	0,02	0,04
M 4+C	klasično / conventional		9,07	1,65	-	0,44	2,85
		s	0,09	0,05	-	0,01	0,04
	Zwick		8,85	1,64	1,40	0,61	2,65
		s	0,16	0,02	0,15	0,03	0,04

preskušanja. Majhna odstopanja lahko zaznamo le pri občutljivem nateznem preskusu v mokrem posebnostno pri peščenih mešanicah z majhno trdnostjo. Tukaj je potrebno posebno pozornost posvetiti umerjanju klasičnih strojev za merjenje natezne trdnosti v mokrem, kot omenjeno že prej. Pri manj zapletenih merilnih metodah, kot je preskušanje vpliva tlačne trdnosti

particular for low strength sand mixtures. Here particular attention must be given to the calibration of the conventional wet tensile testing machines as mentioned above. For less complex measurement methods such as compression crack-strength and shear testing very good correlation can be found for conventional hand driven and modern universal testing methods.

na nastanek razpok in merjenje strižne trdnosti, se dobe zelo dobre korelacije med klasičnimi ročno vodenimi in modernimi univerzalnimi metodami preskušanja.

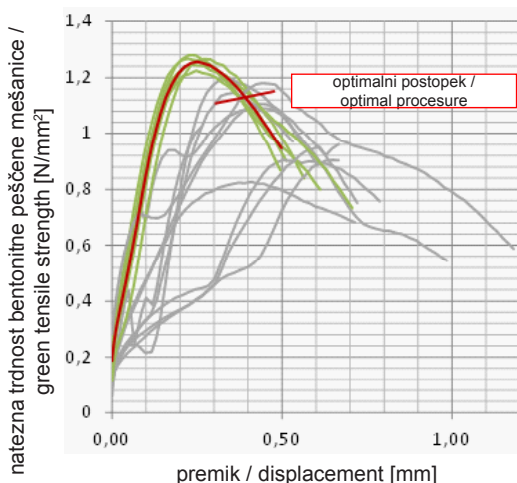
4 Razprava

Najbolj pomembno je, da začetna oblika krivulje trdnost – pomik lahko da določeno informacijo, če se spoštuje pravilen postopek preskušanja. Npr. če se groba površina vzorca dotika nosilca vzorca, predno se uporabi polna sila preskušanja vzorca, lahko to pripelje do spremenljivih oblik krivulje, do stopnic ali celo nastanka minimov [5]. Predvsem pri najmanjših upogibnih momentih ali enostranskih tlačnih ali nateznih silah med začetno obremenitvijo vzorca iz »mehkega« bentonitne peščene mešanice se lahko to vidi med meritvijo s to občutljivo metodo na začetni krivulji. Čeprav se ti učinki pri obremenjevanju vzorca lahko pojavijo tudi pri klasični metodi, se to ne bo zaznalo pri največji merjeni vrednosti. Primerjavo krivulj nateznih preskusov bentonitnih peščenih mešanic daje slika 5, na kateri so vidne podoptimirane in zglajene

4 Discussion

Most importantly the initial shape of the strength displacement curve can give some information if the correct test procedure has been adhered to. In particular a settling of the rough sample surface to the sample holder until the full testing force is applied to the sample can lead to inconsistent curve shapes with steps and even minima [5]. In particular the lowest bending moments or one sided compression or tensile forces during the initial loading of the "soft" green sand sample can become visible in the initial curve during this sensitive measurement method. However, while these effects of sample loading will also occur in conventional testing this will not be detected in the maximum value measured. For comparison curves for the green tensile test are shown in figure 5 in which suboptimal and smooth optimised curve shapes can be seen. From figure 5 is clearly apparent that curves which do not show a smooth increase to a maximum will have lower maximum value.

With optimised measurement techniques in figure 6 each 10 force



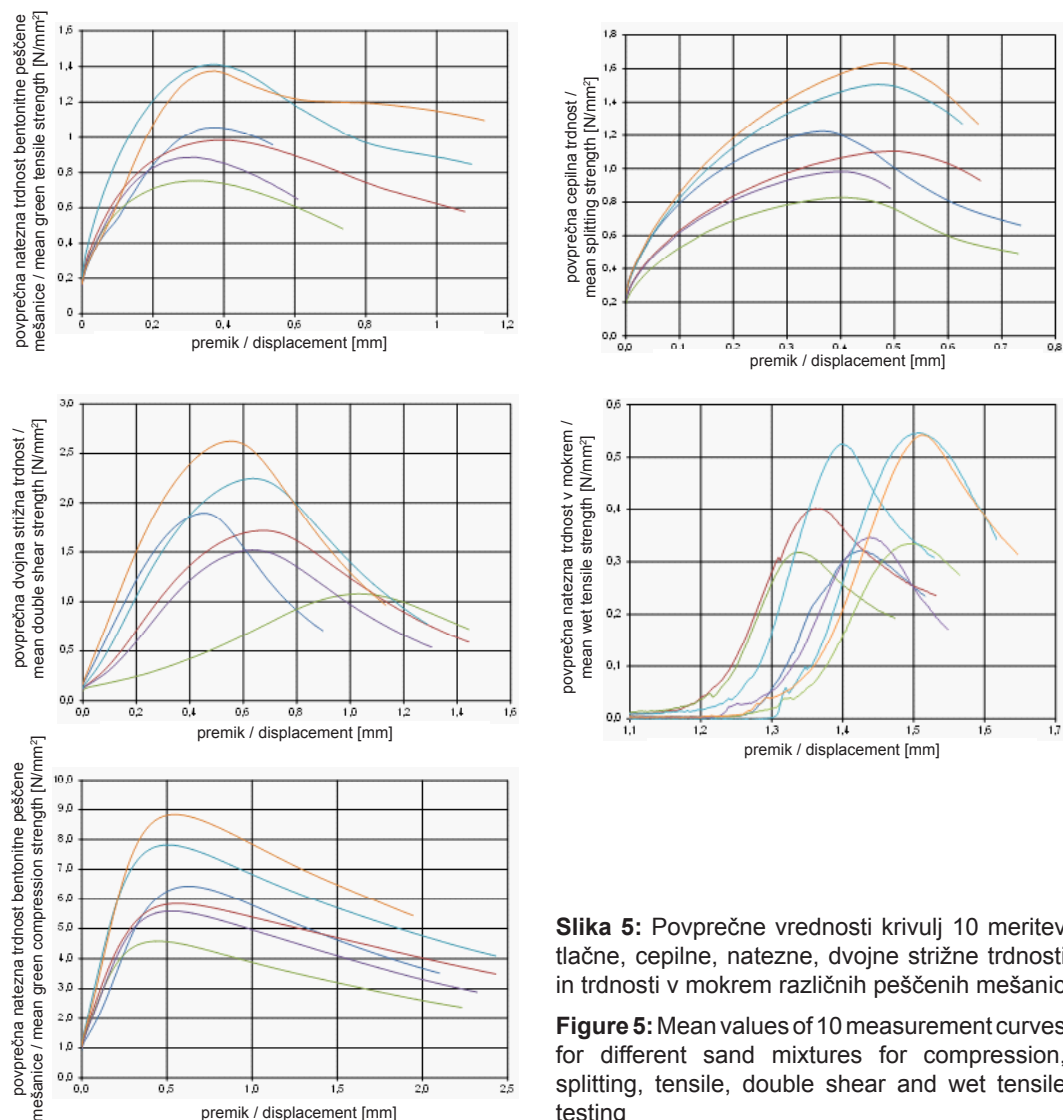
Slika 5: Krivulje natezna trdnost – premik za različne postopke preskušanja, prikaz nestacionarnih krivulj in krivulj za optimiran postopek

Figure 5: Green Tensile Strength-displacement curves for different test procedure and showing non steady curves and the curve for the optimised test procedure

optimirane krivulje. Slika 5 jasno kaže, da imajo krivulje brez mehkega prehoda v maksimum nižjo največjo vrednost.

Pri optimirani tehniki meritev na sliki 6 je vsaka od 10 krivulj sila – premik prikazana kot povprečna vrednost za dano peščeno mešanico in narejena je primerjava z drugimi peščenimi mešanici za uporabljeno metodo preskušanja. Sklepne

displacement curves are shown as mean for a given sand mixtures and compared to the other sand mixtures for a given measuring methods. The summary curves of green compression, splitting strength, double shear, green tensile and wet tensile curves elucidates the behaviour of green sand. The maximum values of these curves represent the following interactions



Slika 5: Povprečne vrednosti krivulj 10 meritev tlačne, cepilne, natezne, dvojne strižne trdnosti in trdnosti v mokrem različnih peščenih mešanic

Figure 5: Mean values of 10 measurement curves for different sand mixtures for compression, splitting, tensile, double shear and wet tensile testing

krivulje za tlačno trdnost bentonitne peščene mešanice, cepilno trdnost, dvojno strižno trdnost, natezno trdnostjo bentonitne peščene mešanice in natezno trdnostjo v mokrem osvetlji obnašanje bentonitnih peščenih mešanic. Največje vrednosti teh krivulj predstavljajo naslednje interakcije s bentonitnimi peščenimi mešanicami: a) majhen delež bentonita (5 %) vodi do majhne trdnosti in brez dodatka premogovega prahu so te trdnosti še manjše (mešanici 3 in 3+C); b) velik delež bentonita (8 %) omogoča višje trdnosti, medtem ko nadaljnje povečanje deležev ima učinek le ob povečanju deležev premogovega prahu (mešanici 4 in 4+C). Zanimivo je, da sta mešanici 1 in 2 z vmesnim deležem 6,5 % bentonita med temi vrednostmi trdnosti.

Zelo pomembno je pripomniti, da se dodatne informacije lahko dobijo iz oblik krivulj sila – premik. Krivulje trdnost – premik kažejo značilno gladko obliko brez stopnic in imajo jasno izražen maksimum. S povečanjem premika krivulje kažejo še nekaj odpora proti deformaciji po dosegu maksimuma. To obnašanje je popolnoma drugačno kot pri krhkih steklih. Odpornost po doseženem maksimumu se lahko pripiše plastičnemu obnašanju zrnatega materiala, sestavljenega iz peska, premoga, bentonita, vode in praznin. Predvsem delež vode ima pomemben učinek na plastičnost. To kaže, da dipolne vezi in drsenje med ploščicami bentonita omogočajo določeno plastično obnašanje, ki je opazno pri preskusih s tlačno komponento [6].

5 Sklepi

Nova metoda preskušanja bentonitnih peščenih mešanic z univerzalnim strojem daje krivulje trdnost – premik z zelo veliko ločljivostjo, če se pravilno pristopi k preskušanju. Rezultati te nove metode se

within green sands. A low bentonite content (5%) leads to low strength, without coal addition the strength values are even lower (mixtures 3 and 3+C). High bentonite contents (8%) achieve high strength values whereas a further increase is noticeable with further addition of coal (mixture 4 and 4+C). Interestingly mixtures 1 and 2 with a medium bentonite content of 6.5% are found in between these strength values.

It is very important to note that additional information can be found in the shape of the force-displacement curves. The strength-displacement curves show characteristic smooth curves without any steps being present which exhibit a clear maximum. With increasing displacement the curves show still some resistance against deformation after the maximum. This behaviour is clearly different to brittle glasses. The resistance after the maximum can be described as plastic behaviour of the granular material consisting of sand, coal, bentonite, water and free volume. In particular the water content has an important effect of the plasticity displayed. This suggests that the dipole bonding and sliding between bentonite plates facilitates some plastic behaviour visible in testing methods with a compressive component [6].

5 Summary

The novel green sand testing method using a universal testing machine can give strength displacements curves of very high resolution if correct test procedures are adhered to. The results of this novel method correlated well with their maximum value to the single value measured by conventional manual driven test apparatuses. However the electronically obtained data can give additional information. In particular the initial

pri največjih vrednostih dobro ujemajo s posameznimi vrednostmi, dobljenimi z ročno vodenimi klasičnimi napravami. Vendar elektronsko dobljeni podatki lahko dajo dodatne informacije. Predvsem začetno povečanje oziroma hitrost doseganja največje vrednosti daje podatek o odpornosti forme proti deformaciji, tj. proti krčenju, ko se upoštevajo vplivi temperature. Maksimum in prikazano plastično obnašanje po doseganju maksimuma lahko v prihodnosti dajo informacijo o obnašanju bentonitnih peščenih mešanic kot zrnatega materiala. S takimi meritvami bo v bodoče možno računanje obnašanja forme po metodi končnih elementov, analizo lastnosti, ki so odvisne od temperature in te metode razširiti še na druge vrste formarskih materialov, kot so organska in anorganska jedra.

Zahvala

To delo je financirala avstrijska agencija za raziskave FFG. Avtorji so predvsem hvaležni za koristne razprave s prof. W. Volkom in dr. H. Polzinom kot tudi za prispevke naših industrijskih partnerjev.

Viri / References

- [1] Giesserei 99 07(2011), p. 46.
- [2] U. Nwagou, Dissertation DTU, Denmark (2012).
- [3] U. Nwagou et al. Int. J. Foundry Research 64(2012) issue 2
- [4] G. Schindelbacher et al., Giesserei 100 (2014) p. 40.
- [5] H. Kerber et al., Gießereirundschau 60,3/4(2013) p. 58
- [6] E. Flemming, W. Tilch, Formstoffe und Formverfahren, 1. Auflage, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig – Stuttgart 1993, p. 58.

increase respectively rate to the maximum value will give the resistance of the mould against deformation against shrinkage once temperature influences are considered. The maximum and the displayed plastic behaviour after the maximum will give in the future more information of the material behaviour of green sands as a granular material. For future finite element calculations of the mould behaviour, temperature dependent property relationship can be obtained with this type of measurement which can also expand to other types of mould materials such as organic and anorganic cores.

Acknowledgements

This work is supported by the Austrian Funding Agency FFG. The authors are particular thankful to the fruitful discussions with Prof. W. Volk and Dr. H. Polzin as well the input from all our industrial partners.