

PĒTĪJUMS

Pelnu izmantošana meža autoceļos

Autori:

Viktors Haritonovs

Andris Paeglītis

Pēteris Šķēls

Raitis Plonis

RĪGA 2017

KOPSAVILKUMS

Enerģija, kas saražota no atjaunojamajiem energoresuriem (AER) Latvijā 2014. gadā sastādīja 36.8% (apmēram 69PJ) no kopējā iekšzemes enerģijas patēriņa (siltums/elektroenerģija) [1]. 82.1% no šīs enerģijas tika saražots ar dažāda veida kurināmo koksni, tai skaitā 24.3% tika saražoti koģenerācijas stacijās [1]. Ik gadu Latvijā tiek saražoti vairāki 10iti tūkstoši tonnu bio-kurināmā vieglo (BKV) pelnu kā blakusprodukts koģenerācijas stacijās.

Iepriekšējie pētījumi, kas tika apskatīti šī pētījuma 1. etapa atskaitē, ir apstiprinājuši, ka lielākā daļa bio-kurināmā vieglo (BKV) pelnu ir piemēroti dažādās būvniecības apakšnozarēs, tai skaitā ceļubūvē. Tādēļ šī pētījuma 2. etapā tiek piedāvāts stabilizēt meža ceļa grants vai dolomīta šķembu segumu ar BKV pelniem 10%, 20% un 30% apjomā no sausa minerālmateriāla masas.

Frakcionētas grants un dolomīta šķembas un to maisījumi ar 10%; 20%; 30% divos periodos paraugotiem BKV pelniem no SIA "FORTUM Latvia" koģenerācijas stacijas Jelgavā (savākti JUL BKV un JAN BKV) tika testēti laboratorijā. Pirms maisījumu veidošanas, tika noteiktas katru BKV pelnu paraugu ķīmiskās īpašības, kā arī grants šķembu un dolomīta šķembu granulometriskais sastāvs. Maisījumu optimālais mitruma saturs tika noteikts standarta Proktora testā. Katram maisījumam tika noteikts pH, kas nosaka vai maisījuma vide ir piemērota ilglaicīgām hidrauliskajām reakcijām, kas tiešā veidā ir saistīts ar stabilizētu šķembu stiprības un stinguma pieaugumu. Nesaistītam šķembām un šķembu maisījumiem ar 10%; 20%; 30% BKV pelniem pie optimālā mitruma satura tika noteikts tūlītējās nestspējas rādītājs (Kalifornijas nestspējas vērtība) Kalifornijas nestspējas (CBR) testā, tā novērtējot īslaicīgās mehāniskās īpašības tikko samaisītam un sablīvētam paraugam. Stabilizētu šķembu paraugi tika atveidoti no Proktora veidnes un uzglabāti 20°C±2°C temperatūrā 7 un 28 dienas ietīti plēvē, lai novērstu iespējamo mitruma iztvaikošanu. Šķembu maisījumi ar 10%; 20%; 30% BKV pelnu pēc 7 un 28 dienu cietēšanas tika testēti vienass spiedes testā, nosakot maksimālo spiedes pretestību, kā arī vienass spiedes deformāciju moduli. Tieši spiedes pretestība tiek lietota, kā kritērijs, lai novērtētu ar BKV pelniem stabilizētu šķembu paraugu atbilstību noteiktai kategorijai (atbilstoši LVS EN 14227-15), bet ceļa segas aprēķinos lieto atbilstošā slāņa deformāciju moduli.

Pētījums "Pelnu izmantošana meža autoceļos" tapis sadarbojoties Rīgas Tehniskajai universitātei, AS "Latvijas Valsts meži" un SIA "FORTUM Latvia". Šī pētījuma otrā etapa mērķis ir veikt laboratorijas testus BKV pelnu – grants un dolomīta šķembu optimālajiem maisījumiem, lai noskaidrotu maisījuma tūlītējās (iestrādājamības) īpašības, kā arī stiprības un stinguma rādītājus pēc 7 un 28 dienu cietēšanas.

SUMMARY

Renewable energy sources (RES) accounted for a 36.8% (approx. 69PJ) share of the gross inland energy consumption in Latvia, 2014 [1]. 82.1% of renewable energy was produced by different kind of wood fuel, but 24.3% of it was produced in cogeneration plants [1]. It was estimated that few ktms of wood fly ash (WFA) was generated as a by-product by cogeneration of electricity and heat in 2014.

Previous studies and experience abroad, which was discovered at the first stage of this research, confirmed that most of the bio-fuel light (GCF) of ash are suitable for various construction sub-sectors, including road construction. Therefore, in this study stage is proposed to stabilize the forest road gravel or dolomite surface layer with 10%, 20% and 30% WFA of the dry weight of mineral material.

Fractioned gravel and dolomite, and mixtures with 10%; 20%; 30% in the two periods sampled WFA from Ltd. FORTUM Latvia BFBF plant in Jelgava (collected in July 2016 and January 2017) were tested at the laboratory. Before making the mixture, WFA chemical properties were determined, as well as gravel and crushed stone dolomite particle size composition. The optimum moisture content of the mixtures was determined in standard Proctor test. pH was determined for each mixture, checking whether the mixture environment is suitable for long-lasting hydraulic reactions, which are directly linked to the strength and stiffness increase. For non-stabilized and stabilized mixes with 10%; 20%; 30% WFA at the optimum moisture content immediate bearing index (California Bearing value) was determined in California bearing capacity (CBR) tests that estimate the short-term properties of the newly mixed and compacted sample. Stabilized crushed stone samples were pushed out from Proctor templates and stored at $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ wrapped in order to prevent the possible evaporation for 7 and 28 days. After 7 and 28 days hardening mixture of 10%; 20%; 30% WFA were tested in uniaxial compression test to determine the maximum compression strength and uniaxial compressive deformation module. Compressive resistance is used as a benchmark to assess whether the WFA stabilized crushed stone samples correspond to a specific strength category, but the corresponding layer deformation module is used in the pavement design.

This project was initiated and developed in collaboration with JSC "Latvia's State Forests" and LLC "FORTUM Latvia". WFA - gravel and dolomite optimal mixes laboratory tests were performed in this second phase of the study to find instant (workability) properties as well as strength and stiffness after 7 and 28 days of hardening.

SATURS

Attēlu saraksts.....	6
Tabulu saraksts.....	8
Uzdevumu referenču saraksts.....	9
Terminu skaidrojums.....	10
Ievads.....	11
1. Pētījumā izmantotie materiāli.....	13
1.1. BKV pelni.....	13
1.1.1 BKV pelnu ķīmiskā analīze.....	13
1.1.2 BKV pelnu klasifikācija.....	15
1.2 Grants un dolomīta šķembas.....	15
1.2.1 Granulometriskais sastāvs.....	15
2. BKV pelnu - šķembu maisījuma izgatavošana.....	19
2.1 Proktora sablīvēšanas tests.....	20
2.2 pH tests.....	24
2.2.1 Parauga sagatavošana pH testam.....	24
2.2.2 pH – metra kalibrēšana.....	24
2.2.3 pH mērījumi.....	25
3. Mehāniskie testi.....	27
3.1 Tūlītējās nestspējas rādītājs (Kalifornijas nestspējas tests (CBR))	
3.2 Spiedes pretestības un elastības moduļa testi.....	28
3.3 Ar BKV pelniem stabilizēto šķembu klasifikācija atbilstoši tūlītējās nestspējas un vienass spiedes testa rezultātiem.....	30
4. Tūlītējās nestspējas rādītājs (IPI) testa rezultāti.....	33
4.1 Maisījumi ar JUL BKV pelniem.....	33
4.1.1 Grants šķembas.....	33
4.1.2 Dolomīta šķembas.....	33

4.2 Maisījumi ar JAN BKV pelniem.....	34
4.2.1 Grants šķembas.....	34
4.2.2 Dolomīta šķembas.....	35
4.2 Tūlītējās nestspējas rādītājs (IPI) testa rezultātu kopsavilkums.....	35
5. Vienass spiedes stiprības (UCS) testa rezultāti.....	37
5.1 Maisījumi ar JUL BKV pelniem.....	37
5.1.1 Grants šķembas.....	37
5.1.2 Dolomīta šķembas.....	37
5.2 Maisījumi ar JAN BKV pelniem.....	38
5.2.1 Grants šķembas.....	38
5.1.2 Dolomīta šķembas.....	39
5.3 Vienass spiedes pretestības (UCS) testa rezultātu kopsavilkums.....	39
6. Vienass deformācijas moduļa testēšanas rezultāti.....	41
6.1 Maisījumi ar JUL BKV pelniem.....	41
6.1.1 Grants šķembas.....	41
6.1.2 Dolomīta šķembas.....	41
6.2 Maisījumi ar JAN BKV pelniem.....	42
6.2.1 Grants šķembas.....	42
6.2.2 Dolomīta šķembas.....	43
6.3 Vienass deformāciju moduļa testa rezultātu kopsavilkums.....	43
Secinājumi un rekomendācijas.....	45
Literatūras saraksts.....	47
1. PIELIKUMS tūlītējās nestspējas rādītāji.....	49
2. PIELIKUMS vienass spiedes testi.....	65

ATTĒLU SARAKSTS

1. Attēls	Tipiskā meža ceļa konstrukcija.....	11
1.1 Attēls	BKV pelnu ķīmiskās analīzes shēma.....	13
1.2 Attēls	BKV pelnu CaO saturs laika periodam 2015. gada novembris līdz 2017. gada janvāris.....	14
1.3 Attēls	BKV pelnu hidrauliskuma modulis laika periodam 2015. gada novembris līdz 2017. gada janvāris.....	15
1.4 Attēls	Dolomīta šķembas būvobjektā Dreiliņos.....	16
1.5 Attēls	Grants šķembu ceļš Spicenieki – Meiri.....	16
1.6 Attēls	Parauga samazināšanas iekārta.....	17
1.7 Attēls	Granulometriskā sastāva noteikšana sijājot.....	17
1.8 Attēls	Dolomīta šķembu granulometriskais sastāvs.....	18
1.9 Attēls	Grants šķembu granulometriskais sastāvs.....	18
2.1 Attēls	Betona maisītājs BKV pelnu – šķembu maisījuma izgatavošanai.....	19
2.2 Attēls	BKV pelnu – grants šķembu maisījums.....	20
2.3 Attēls	Proktora veidne ar augšējo gredzenu.....	21
2.4 Attēls	Automātiskā Proktora blīvēšanas iekārta.....	21
2.5 Attēls	Grants šķembu un grants šķembu - BKV pelnu (JUL BKV) maisījumu sausā blīvuma un mitruma atkarība standarta Proktora testā.....	22
2.6 Attēls	Dolomīta šķembu un dolomīta šķembu - BKV pelnu (JUL BKV) maisījumu sausā blīvuma un mitruma atkarība standarta Proktora testā.....	22
2.7 Attēls	Grants šķembu un grants šķembu - BKV pelnu (JAN BKV) maisījumu sausā blīvuma un mitruma atkarība standarta Proktora testā.....	23
2.8 Attēls	Dolomīta šķembu un dolomīta šķembu - BKV pelnu (JAN BKV) maisījumu sausā blīvuma un mitruma atkarība standarta Proktora testā.....	23
2.9. Attēls	Sartorius PT-15 pārnēsājamais pH/mV/temperatūras mērītājs.....	25
2.10 Attēls	pH mērījums, iemērcot pH-metra elektrodu parauga kolbā.....	25
3.1 Attēls	CBR tests. CBR iekārta, paraugs testēšanas laikā un paraugs pēc testēšanas.....	27
3.2 Attēls	CBR testa slodze atkarībā no virzuļa ieņemšanas grafiks un CBR vērtību noteikšana.....	28

3.3 Attēls	Cilindriskie paraugi pēc Proktora blīvēšanas. Izspiešanas no Proktora veidnes, uzglabāšana pirms spiedes stiprības un elastības moduļa testiem, cilindrisks Proktora parauga virsmas līdzināšana.....	29
3.4 Attēls	Vienass spiedes testa iekārta ar LVDT mērītājiem.....	29
3.5 Attēls	Vienass spiedes testa piemērs. Testēšanas rezultātu noteikšana.....	30
4.1 Attēls	Tūlītējās nestspējas rādītāja (IPI) grants šķembām un grants šķembu maisījumam ar JUL BKV pelniem.....	33
4.2 Attēls.	Tūlītējās nestspējas rādītāja (IPI) dolomīta šķembām un dolomīta šķembu maisījumam ar JUL BKV pelniem.....	34
4.3 Attēls	Tūlītējās nestspējas rādītāja (IPI) grants šķembām un grants šķembu maisījumam ar JAN BKV pelniem.....	34
4.4 Attēls	Tūlītējās nestspējas rādītāja (IPI) dolomīta šķembām un dolomīta šķembu maisījumam ar JAN BKV pelniem.....	35
5.1 Attēls	Vienass spiedes pretestība (UCS) grants šķembām un grants šķembu maisījumam ar JUL BKV pelniem pēc 7 un 28 dienu uzglabāšanas.....	37
5.2 Attēls	Vienass spiedes pretestība (UCS) dolomīta šķembām un dolomīta šķembu maisījumam ar JUL BKV pelniem pēc 7 un 28 dienu uzglabāšanas.....	38
5.3 Attēls	Vienass spiedes pretestība (UCS) grants šķembām un grants šķembu maisījumam ar JAN BKV pelniem pēc 7 un 28 dienu uzglabāšanas.....	38
5.4 Attēls	Vienass spiedes pretestība (UCS) dolomīta šķembām un dolomīta šķembu maisījumam ar JAN BKV pelniem pēc 7 un 28 dienu uzglabāšanas.....	39
6.1 Attēls	Vienass deformāciju modulis (E_{30}) grants šķembu maisījumam ar JUL BKV pelniem pēc 7 un 28 dienu uzglabāšanas.....	45
6.2 Attēls	Vienass deformāciju modulis (E_{30}) grants šķembām un grants šķembu maisījumam ar JUL BKV pelniem pēc 7 un 28 dienu uzglabāšanas.....	41
6.3 Attēls	Vienass deformāciju modulis (E_{30}) grants šķembu maisījumam ar JAN BKV pelniem pēc 7 un 28 dienu uzglabāšanas.....	41
6.4 Attēls	Vienass deformāciju modulis (E_{30}) grants šķembām un grants šķembu maisījumam ar JAN BKV pelniem pēc 7 un 28 dienu uzglabāšanas.....	43

TABULU SARAKSTS

1.1 Tabula	BKV pelnu ķīmiskais sastāvs.....	14
2.1 Tabula	pH testa rezultāti.....	26
3.1 Tabula	Tūlītējas nestspējas indeksa kategorijas.....	31
3.2 Tabula	Spiedes stiprības kategorijas Proktora cilindriskiem paraugiem.....	31
5.1 Tabula	Vienass spiedes pretestības vidējās vērtības grants šķembu – BKV pelnu maisījumiem pēc 7 un 28 dienu cietēšanas.....	39
5.2 Tabula	Vienass spiedes pretestības vidējās vērtības dolomīta šķembu – BKV pelnu maisījumiem pēc 7 un 28 dienu cietēšanas.....	40
6.1 Tabula	Vienass deformāciju moduļa vidējās vērtības gants šķembu – BKV pelnu maisījumiem pēc 7 un 28 dienu cietēšanas.....	43
6.2 Tabula	Vienass deformāciju moduļa vidējās vērtības gants šķembu – BKV pelnu maisījumiem pēc 7 un 28 dienu cietēšanas.....	44

UZDEVUMU REFERENČU SARAKSTS

Nr.	Projekta 2. etapa uzdevumi	Nodaļas numuri
2.1	Eksperimentālo pētījumu metodikas izstrāde	1; 2; 3; 4.
2.2	Eksperimentu veikšana laboratoriskos apstākļos (pelnu paraugi – FL, grunts paraugi – LVM materiāli)	1; 2; 3; 4; 5; 6.
2.3	Pētījumā izmantojamo pelnu ķīmiskā sastāva noteikšana (1 pelnu paraugs tiek ņemts pētījuma sākumā ķīmiskā sastāva noteikšanai, pārējie – noslēdzoties literatūras analīzei)	1.1.1
2.4	Pelnu piejaukšanas apjoma procentuālās attiecības izvēle (2 izvēlēto pelnu veidi, 2 grunts veidi, katram pa 4 dažādiem % saturiem ar 3 atkārtojumiem - 42 paraugi)	2; 2.1
2.5	pH mērīšana visiem paraugiem	2.2
2.6	Grunts paraugu ņemšana, apstrāde atbilstoši LVS EN 13286-2:2012 L „Nesaistītie un hidrauliski saistītie maisījumi. 2.daļa: Laboratorijas atsauces blīvuma un ūdens saturs testēšanas metodes. Proktora sablīvēšana”	1.2; 2.1
2.7	Optimālā mitruma noteikšana grunts + saistvielu (atšifrējums) maisījumiem nepieciešamo stiprības parametru sasniegšanai	2.1
2.8	Saistvielu + grunts maisījuma sajaukšana optimālajā mitrumā, uzpildīšana veidnēs un Proktora sablīvēšana	2.1
2.9	Tūlītējās nestspējas indeksa (CBR tests) noteikšana atbilstoši LVS EN 13286-47:2012 “Nesaistītie un hidrauliski saistītie maisījumi. 47. daļa: Kalifornijas nestspējas vērtības, tūlītējās nestspējas indeksa un lineārās izplešanās noteikšanas testēšanas metode”	4
2.10	Paraugu uzglabāšana atbilstoši LVS EN 14227-15:2016 “Hidrauliski saistītie maisījumi. Specifikācijas. 15.daļa: Hidrauliski stabilizētas grunts”	3.2; 3.3
2.11	Saistvielu + grunts maisījuma vienas spiedes stiprības (Rc) noteikšana atbilstoši LVS EN 13286-41:2013L “Nesaistītie un hidrauliski saistītie maisījumi. 41. daļa: Hidrauliski saistītu maisījumu stiprības testēšanas metode”, kā arī deformācijas moduļa (E) noteikšana atbilstoši LVS EN 13286-43:2013L “Nesaistītie un hidrauliski saistītie maisījumi. 43. daļa: Hidrauliski saistītu maisījumu elastības moduļa testēšanas metode”	5; 6
2.12	Rezultātu iegūšana, apstrāde, analīze, tādējādi iegūstot rezultātus, kas parāda konkrēto saistvielu cietēšanas efektivitāti un pelnu ietekmi uz ceļu nestspēju, nestspējas nodrošināšanu un/vai uzlabošanu	4.2; 5.3; 6.3

TERMINU SKAIDROJUMS

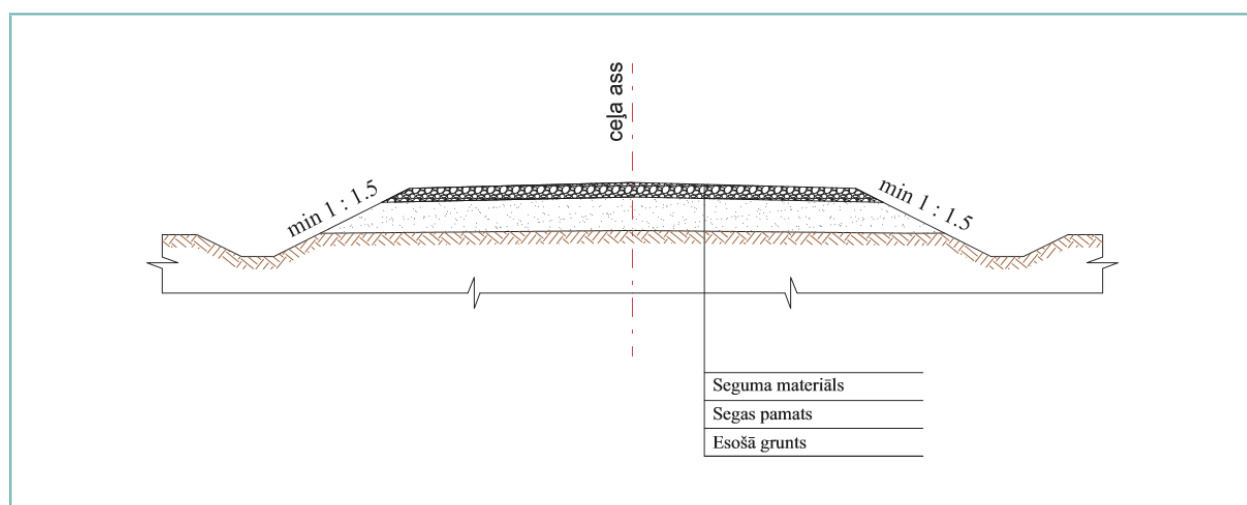
AER	Atjaunojamie energoresursi ir vēja enerģija, saules enerģija, hidroelektroenerģija, okeāna enerģija, ģeotermālā enerģija, biomasas un biodeģviela
BFB	Burbuļojoša verdoša slāņa krāsns (Bubbling fluidized bed furnace)
LoI	Karsēšanas zudumi
CBR	Kalifornijas nestspējas rādītājs, kurš izteikts % no references vērtībām
IPI	Tūlītējās nestspējas indekss, kurš noteikts Kalifornijas nestspējas testā (CBR), kurš izteikts % no references vērtībām
UCS	Vienass spiedes tests, paraugu slogojot spiedē ar konstantu ātrumu
E_{30}	Vienass deformāciju modulis, kurš noteikts UCS testā kā tangentes modulis pie 30% no maksimālās spiedes stiprības vērtības
JUL BKV pelni	BKV pelni, kuru paraugi tika paņemti 2016. gada jūlijā
JAN BKV pelni	BKV pelni, kuru paraugi tika paņemti 2017. gada janvārī

IEVADS

Enerģija, kas saražota no atjaunojamajiem energoresurciem (AER) Latvijā 2014. gadā sastādīja 36.8% (apmēram 69PJ) no kopējā iekšzemes enerģijas patēriņa (siltums/elektroenerģija) [1]. 82.1% no šīs enerģijas tika saražots ar dažāda veida kurināmo koksni, tai skaitā 24.3% tika saražoti koģenerācijas stacijās [1]. Ik gadu Latvijā tiek saražoti vairāki 10iti tūkstoši tonnu bio-kurināmā vieglo (BKV) pelnu kā blakusprodukts koģenerācijas stacijās.

Lai gan iepriekšējie pētījumi ir apstiprinājuši, ka lielākā daļa biomasas vieglo pelnu (arī BKV pelni) ir piemērota saistviela dažādās būvniecības apakšnozarēs, joprojām BKV pelni galvenokārt tiek deponēti izgāztuvēs, tās ievērojami noslogojot. Bio-kurināmā pelni šajā pētījumā tiek apskatīti kā alternatīvs materiāls ceļu segas izbūvē, samazinot izraktā akmens materiāla nepieciešamību. Stabilizējot grunts materiālu ir iespējams uzlabot ceļa segā projektētā materiāla lietojamību un nestspēju. Materiālu izvēle, parasti tiek pamatota ar vairākiem kritērijiem - fizikāli-mehāniskās īpašības, pieejamība un izmaksas. Visbiežāk kā saistviela grunšu stabilizācijā tiek lietots cements vai neveltzētie kaļķi, bet bio-kurināmā pelni ir alternatīva, kura, piemēram, Zviedrijā un Somijā plaši tiek lietota mazākas nozīmes ceļu būvniecībā. BKV pelni ir tikuši veiksmīgi pielietoti vairākos ceļu un laukumu projektos Eiropā [2-17]. Testēšanas rezultāti pēc izbūves ir apstiprinājuši, ka ceļa konstrukcijām ar BKV pelnu stabilizētiem slāņiem ir augstākas nestspējas un lietojamības īpašības, salīdzinājumā ar references ceļa konstrukcijām tādos pašos apstākļos. Sasalšanas – atkuššanas, kūkumošanās un risu veidošanās problēmas tiek samazinātas.

Katru gadu Latvijā tiek atjaunoti/pārbūvēti vai no jauna uzbūvēti aptuveni 300km meža ceļu, kuri ir svarīga sastāvdaļa no meža infrastruktūras. Meža ceļi tiek ekspluatēti ar maksimāli atļauto ass slodzi – 10t visu gadu, izņemot pavasara un rudens sasalšanas-atkušņa periodus. Tipiskā meža ceļa konstrukcija ir attēlota 1. attēlā.



1. Attēls. Tipiskā meža ceļa konstrukcija

AS "Latvijas Valsts Meži" apsaimnieko un tiem pieder >11000km meža ceļu tīkla Latvijā, un pastāv ekonomiski, tehniski un ietekmes uz vidi apsvērumi, kā vēlreiz izmantot vai kā samazināt minerālā materiāla izmantošanu meža ceļu atjaunošanā, pārbūvē un jaunu ceļu būvniecībā. Tajā pašā laikā SIA "FORTUM Latvia" burbuļojoša verdošā slāņa krāsns koģenerācijas stacijā Jelgavā ar maksimālo jaudu 77MW tiek saražoti apmēram 4000 tonnas BKV pelnu gadā kā blakusprodukts. Šobrīd lielākā daļa BKV pelnu tiek deponēti izgāztuvēs, tādā veidā tās ievērojami pārslogojot. Šajā pētījumā tiek apskatīta BKV pelnu no SIA "FORTUM Latvia" koģenerācijas stacijas Jelgavā izmantošanas iespēja meža ceļu atjaunošanā, pārbūvē un jaunu ceļu būvniecībā, kā ceļa segumu izmantojot ar BKV pelniem stabilizētu grants vai dolomīta šķembu maisījumu.

Tika noteikts, ka BKV pelnos no SIA "FORTUM Latvia" koģenerācijas stacijas Jelgavā ķīmiskajā sastāvā ir augsts SiO_2 (>43.10%), $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ($\text{R}_2\text{O} - (> 5\%)$) un CaO (> 19.67%) saturs. Aprēķinātais hidrauliskuma modulis ($m = 1.74-2.8$) norāda, ka izmantotie pelni ir aktīva pucolāna saistviela.

Parasti meža ceļa segums tiek izbūvēts no grants vai dolomīta šķembu maisījuma atbilstoši Meža autoceļu specifikācijām. Sablīvētas šķembas ir elastīgi-plastisks materiāls, kas deformējas pieliekot slodzi. Šīm deformācijām akumulējoties veidojas rīses. Uz meža ceļiem attiecas galvenokārt 1 un 2 tipa risu veidošanās mehānismi [18]. 1. tipa rīses veidojas, ja nesaistītais materiālam tuvu ceļa segas virsmai nav pietiekama bīdes pretestība, kamēr 2. tipa rīses veidojas, ja bīdes deformācijas attīstās ceļa segas pamatkārtā vai esošajā gruntī zem uzbēruma. Stabilizēts meža ceļa segums ne tikai spēj uzņemt lielāku vertikālo slodzi, bet arī samazina vertikālos un bīdes spriegumus zem seguma slāņa.

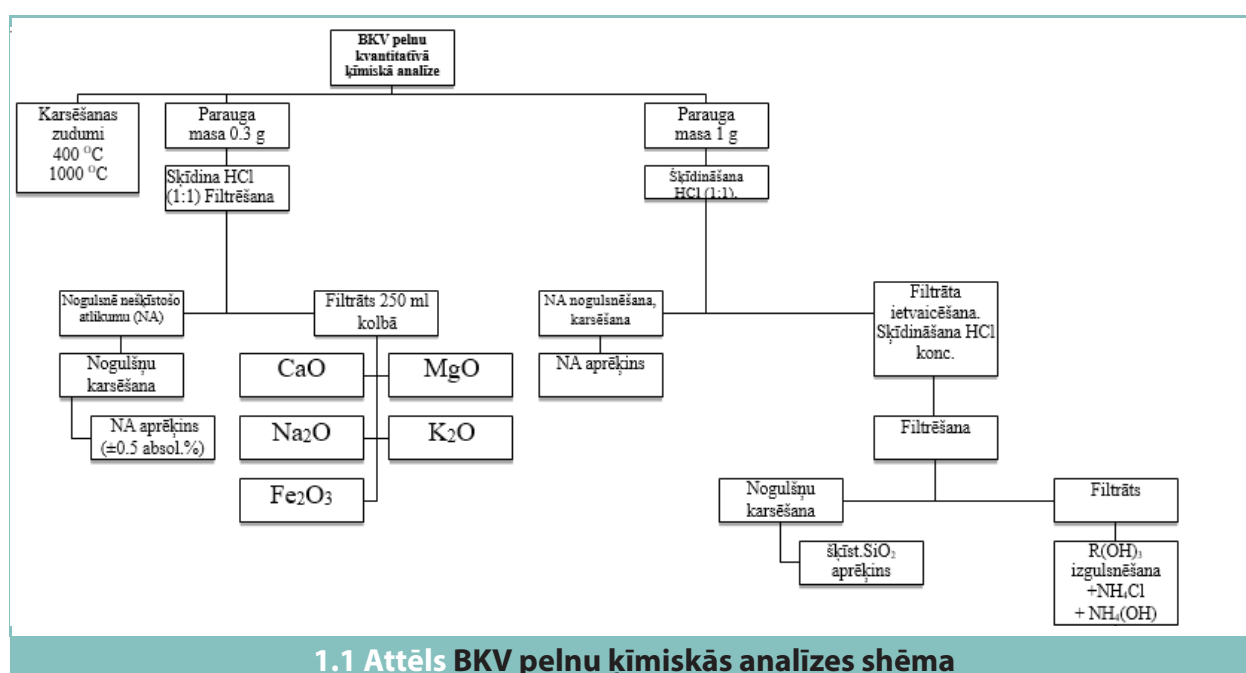
Frakcionētas grants un dolomīta šķembas un to maisījumi ar 10%; 20%; 30% divos periodos paraugotiem BKV pelniem no SIA "FORTUM Latvia" koģenerācijas stacijas Jelgavā (savākti JUL un JAN) tika testēti laboratorijā. Pirms maisījumu veidošanas, tika noteiktas katru BKV pelnu paraugu ķīmiskās īpašības, kā arī grants šķembu un dolomīta šķembu granulometriskais sastāvs. Maisījumu optimālais mitruma saturs tika noteikts standarta Proktora testā. Katram maisījumam tika noteikts pH, kas nosaka vai maisījuma vide ir piemērota ilglaicīgām hidrauliskajām reakcijām, kas tiešā veidā ir saistīts ar stabilizētu šķembu stiprības un stinguma pieaugumu. Nesaistītam šķembām un šķembu maisījumiem ar 10%; 20%; 30% BKV pelniem pie optimālā mitruma satura tika noteikts tūlītējās nestspējas rādītājs (Kalifornijas nestspējas vērtība) Kalifornijas nestspējas (CBR) testā, tā novērtējot īslaicīgās mehāniskās īpašības tikko samaisītam un sablīvētam paraugam. Stabilizēti šķembu paraugi tika atveidoti no Proktora veidnes uzglabāti $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ temperatūrā ietīti, lai novērstu iespējamo mitruma iztvaikošanu, 7 un 28 dienas. Stabilizētu šķembu paraugi tika atveidoti no Proktora veidnes un uzglabāti $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ temperatūrā 7 un 28 dienas ietīti plēvē, lai novērstu iespējamo mitruma iztvaikošanu. Tieši spiedes pretestība tiek lietota, kā kritērijs, lai novērtētu ar BKV pelniem stabilizētu šķembu paraugu atbilstību noteiktai kategorijai (atbilstoši LVS EN 14227-15), bet ceļa segas aprēķinos lieto atbilstošā slāņa deformāciju moduli.

1. PĒTĪJUMĀ IZMANTOTIE MATERIĀLI

1.1. BKV PELNI

1.1.1 BKV PELNU ĶĪMISKĀ ANALĪZE

BKV pelnu ķīmiskais sastāvs noteikts izmantojot klasisko kvantitatīvās ķīmiskās analīzes principu. Sākotnēji 400°C un 1000 °C temperatūrā tika noteikts BKV pelnu karsēšanas zudums. Karsēšanas rezultātā no parauga izdalās fizikāli saistītais ūdens un CO₂. Iegūtie rezultāti ļauj noteikt BKV paraugā esošo hidroksīdu un karbonātu saturu. Turpmākā BKV pelnu ķīmiskā analīze veikta saskaņā ar LVS EN 196-2:2013 "Cementa testēšanas metodes. 2. daļa: Cementa ķīmiskā analīze". Analīzei paņemts 5 gramu reprezentatīvs BKV pelnu parauga daudzums. BKV pelnu ķīmiskās analīzes shēma dota 1.1. Attēlā. Paraugu šķīdinot sālsskābes šķīdumā, nosaka nešķīstošo atlikumu (NA), kas savukārt izsaka smilts saturu. Pēc parauga izšķīdināšanas skābē, ar gravimetriskās, kompleksonometriskās titrēšanas, liesmas fotometrijas un kolometrisku analīzi iegūtajā šķīdumā nosaka CaO, MgO, Na₂O, K₂O, Fe₂O₃, Al₂O₃, SO₃ un SiO₂ (aktīvo un neaktīvo).



Analizējot JUL un JAN BKV pelnu paraugu ķīmiskā sastāva rezultātus konstatēts, ka BKV pelnu ķīmiskajam sastāvam raksturīgs augsts SiO₂, R₂O₃(Al₂O₃ + Fe₂O₃) un CaO saturs (skat. Tabulu 1.1). Atbilstoši LVS EN 14227-4 standartam tie klasificējami kā kalcifīlie (*calcareus*) pelni, kuriem piemīt hidrauliskās un

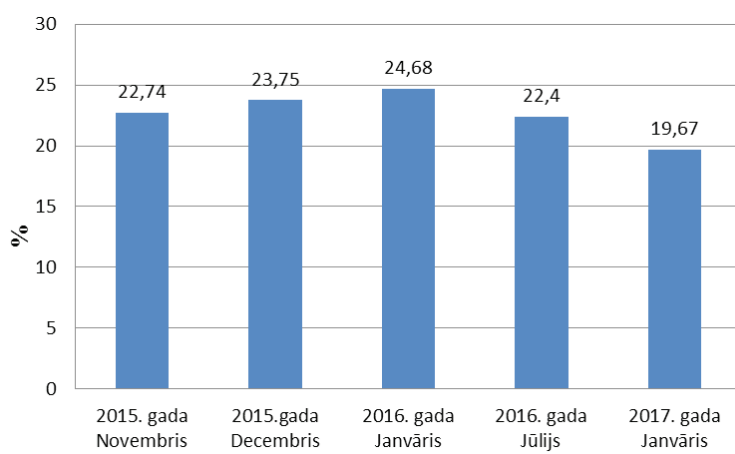
pucolāna īpašības. 1.2. Attēlā dots CaO saturs laika periodā no 2015. gada novembra līdz 2017. gada janvārim. Salīdzinot divos pētījuma etapos iegūtos BKV pelnu ķīmiskā sastāva rezultātus secināts, ka Latvijas (SIA "FORTUM Latvia") un Zviedrijas (Falkenberg) pelnu CaO saturs ir līdzīgs.

1.1. tabula

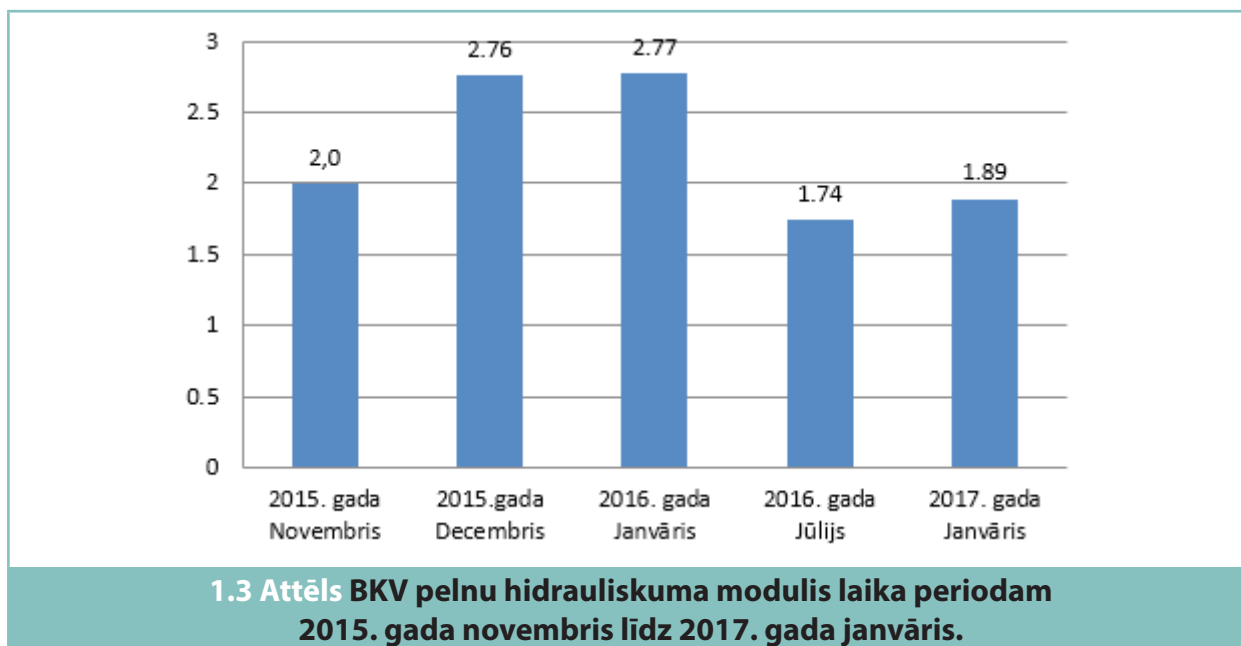
BKV pelnu ķīmiskais sastāvs

Komponente	Daudzums, %		Analīzes precizitāte, ± absol.%
	JUL	JAN	
SiO ₂	55,6	54,11	± 0,7
SiO ₂ aktīvais	-	2,84	
R ₂ O ₃ (Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃)	10,48	8,80	± 0,7
CaO	22,40	19,67	± 0,5
MgO	2,63	2,31	± 0,3
Fe ₂ O ₃	1,41	1,23	± 0,1
K ₂ O	1,77	2,86	± 0,3
Na ₂ O	1,39	1,45	± 0,1
Al ₂ O ₃ = R ₂ O ₃ - Fe ₂ O ₃	9,07	7,57	± 0,5
SO ₃	4,60	5,97	± 0,5
Hidrauliskuma modulis	1,74	1,89	-

Šajā pētījuma etapā noteikti BKV pelnu (JUL un JAN) hidrauliskuma moduli - 1,74 un 1,89 ir nedaudz zemāki par pirmajā pētījuma etapā noteiktiem - 2,0 līdz 2,77 (skat. 1.3 Attēlu). Tomēr visu piecu paraugu rezultāti norāda, ka SIA "FORTUM Latvia" BKV pelni ir stipra hidrauliska saistviela un aktīvs pucolāna materiāls.



1.2 Attēls BKV pelnu CaO saturs laika periodam 2015. gada novembris līdz 2017. gada janvāris.



1.1.2 BKV PELNU KLASIFIKĀCIJA

BKV pelnu klasifikāciju veic saskaņā ar LVS EN 14227-4 "Hidrauliski saistītie maisījumi - Specifikācijas - 4.daļa: Hidrauliski saistīto maisījumu izmešu pelni". BKV pelnu izmantošanai ceļiem, lidlaukiem un citiem satiksmes laukumiem klasificē divās kategorijas – silicītu (siliceous) un kalcifilie (calcareus) pelni. Šajā pētījumā izmantotie pelni saskaņā ar LVS EN 14227-4 atbilst kalcifilo pelnu kategorijai, jo to sastāvu veido SiO_2 , Al_2O_3 , CaO un SO_2 ar hidrauliskām un pucolāna īpašībām.

1.2 GRANTS UN DOLOMĪTA ŠĶEMBAS

1.2.1 GRANULOMETRISKAIS SASTĀVS

Pētījumam izvēlēts divu veidu minerālmateriāls - 0/45 frakcijas dolomīta un grants šķembas. Dolomīta šķembas ņemtas no būvobjekta Dreiliņos, kuras bija paredzētas segas nesaistītas nesošās virskārtas būvniecībai (skat. Attēlu 1.4), bet grants šķembas no AS "Latvijas Valsts Meži" rekonstruēta ceļa Spicenieki – Meiri (skat. Attēlu 1.5).



1.4 Attēls Dolomīta šķembas būvobjektā Dreiliņos



1.5 Attēls Grants šķembru ceļš Spicenieki – Meiri

Šķembru maisījumu granulometriskā sastāva noteikšana veikta saskaņā ar LVS EN 933-1 „Minerālo materiālu ģeometrisko īpašību testēšana. 1.daļa: Daļiņu izmēra sadalījuma noteikšana. Sijāšanas metode”. Standarts attiecas uz dabīgas vai mākslīgas izcelsmes minerālajiem materiāliem, ieskaitot vieglos minerālos materiālus ar nominālo izmēru līdz 90 mm, bet neietver aizpildītāju. Lai iegūtu vajadzīgo testēšanas porciju skaitu, paraugu kvartēšana veikta saskaņā ar LVS EN 932-2 „Minerālo materiālu vispārējo īpašību testēšana - 2.daļa: Laboratorijas paraugu samazināšanas metodes”. Lai veiktu visus nepieciešamos testus, paraugi tika paņemti pietiekošā daudzumā (vienas izcelsmes materiāla daudzums apmēram 700kg). Paraugs pirms testēšanas uzglabāts speciālos maisos un to kvartēšana veikta izmantojot speciālu samazināšanas iekārtu (skat. Attēlā 1.6). Testējamais materiāls pirms testēšanas tika izsijāts caur 22,4 mm sietu un žāvēts 60°C temperatūrā.



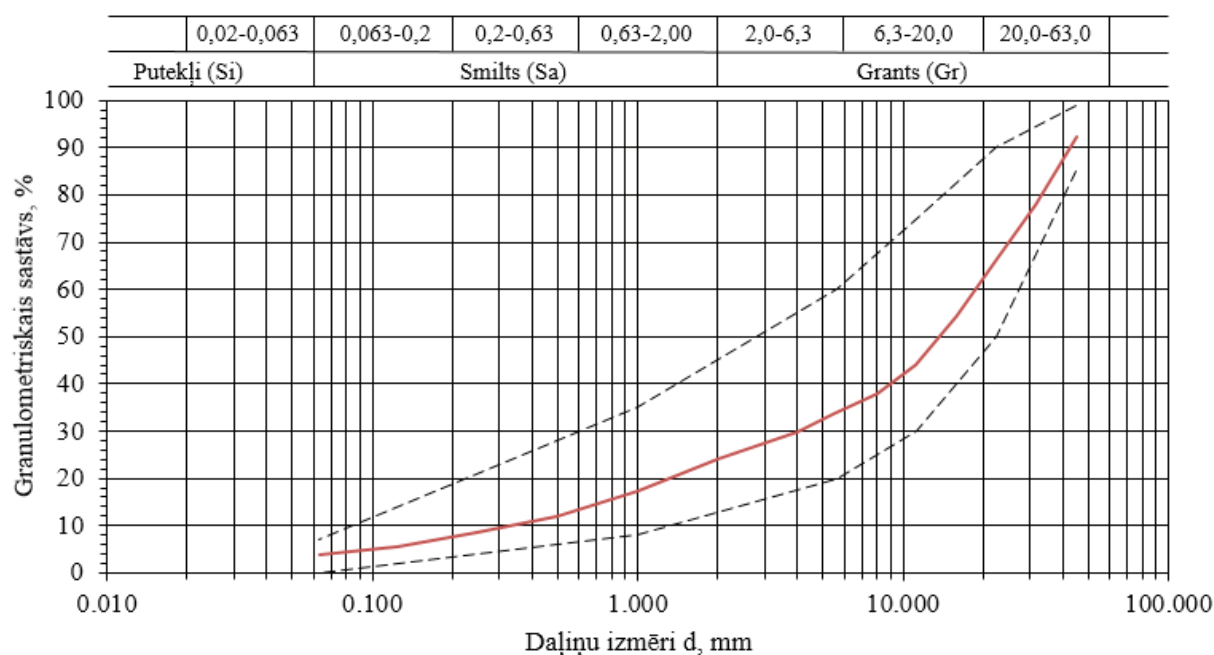
1.6 Attēls Parauga samazināšanas iekārta

Testēšanas laikā paraugs (pēc kvartēšanas) žāvēts līdz konstantai masai pie temperatūras $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$. Pēc tam izžāvēts paraugs tika nosvērts un samitrināts ar ūdeni, lai nodrošināt pilnīgu smalko frakciju atdalīšanos un suspensijas izveidošanu un, izmantojot 0,063 mm granulometrisku sietu, veikta parauga mazgāšana. Izmazgāts un izžāvēts materiāls tika iebērts sijāšanas kolonnā (skat. 1.7 Attēlu), kuru veido noteikts skaits kopā saliktu un no augšas uz apakšu atvērumu samazinājuma secībā sakārtotu sietu. Pēc parauga sijāšanas sietu kolonnā (sietu sērija no 0,063mm līdz 63mm) tika noteikti katras frakcijas daļēji atlikumi un cauri izgājušo daļiņu daudzums.

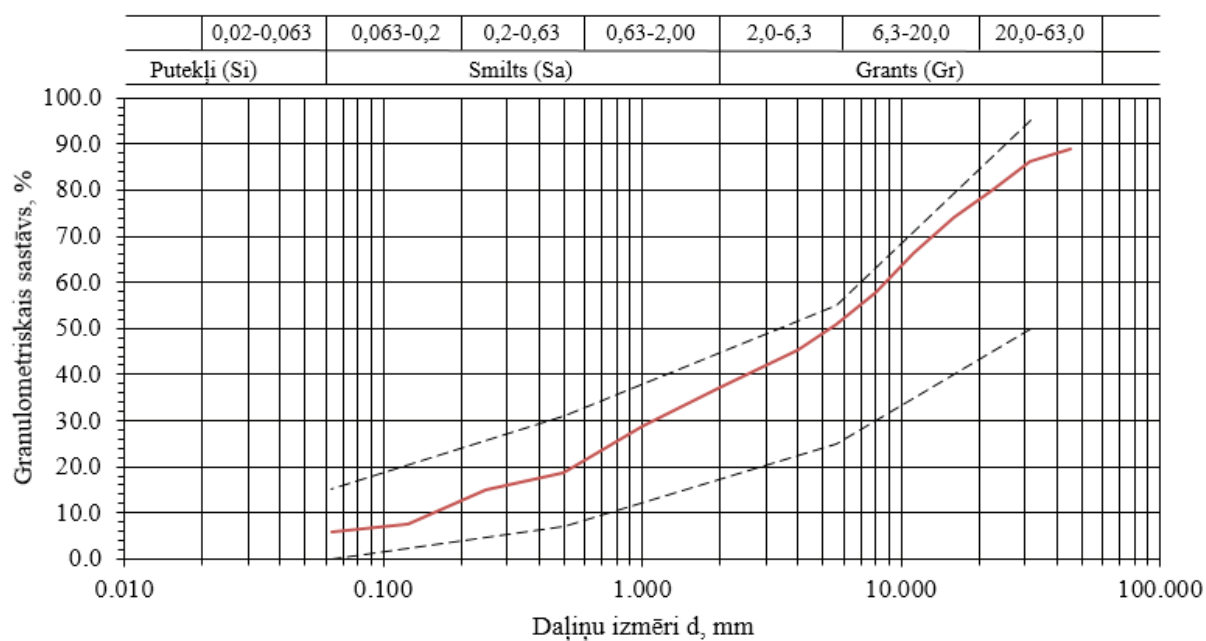


1.7 Attēls Granulometriskā sastāva noteikšana sijāot

Atbilstoši Meža autoceļu būvniecības specifikācijas 2011 (MAC 2011) prasībām, veikts izvēlētā materiāla novērtējums granulometriskā sastāva prasībām (MAC 2011 p.8.3.1 un MAC 2011 p.8.2). Analizējot testēšanas rezultātus, konstatēts, ka dolomīta un grants šķemšu granulometriskais sastāvs atbilst specifikācijās noteiktajām robežvērtībām (skat. Attēlos 1.8 un 1.9). Attēlos 1.8 un 1.9 granulometriskā sastāva līknēs norādītas ar raustītu līniju, kā maksimālās un minimālās pieļaujamās robežvērtības.



1.8 Attēls Dolomīta šķembu granulometriskais sastāvs



1.9 Attēls Grants šķembu granulometriskais sastāvs

2. BKV PELNU - ŠĶEMBU MAISĪJUMA IZGATAVOŠANA

Pirms maisīšanas BKV pelni un caur 22,4m sietu izsijātas šķembas tika izžāvētas līdz konstantai masai un sasvērti proporcionālos daudzumos, šajā pētījumā apskatot 10%, 20% un 30% šķembu – BKV pelnu maisījumus (BKV pelnu/šķembu proporcija 10/90, 20/80 un 30/70). BKV pelnu – šķembu maisījuma izgatavošana veikta izmantojot betona maisītāju, kurā iespējams izgatavot līdz 90 litriem betona (skat. Attēlu 2.1). Maisījuma izejmateriāli secīgi, t.i., šķembas un tad pelni, tika iebērti slēgtā traukā, lai tos nogādātu līdz betona maisītājam. Tā kā pelni ir hidroskopisks materiāls, BKV pelnu – šķembu maisījuma izgatavošana veikta uzreiz pēc žāvēšanas un materiāla atdzišanas.



2.1 Attēls Betona maisītājs BKV pelnu – šķembu maisījuma izgatavošanai

Lai iegūt viendabīgu maisījumu (skat. 2.2 Attēlu) izvēlēts 5min maisīšanas laiks ar maisīšanas ātrumu 26,6 apgr./min. Vienā maisīšanas reizē izgatavoti 60kg maisījuma, kas ir pietiekoši 9 paraugu sēriju izgatavošanai (3 paraugi tūlītējām CBR rādītājam, 3paraugi spiedes stiprībai pēc 7 diennaktīm un 3 paraugi spiedes stiprībai pēc 28 diennaktīm). Pēc tam materiālu izņem no maisītāja un kvartē testēšanas porcijās, piejauc noteikto ūdens daudzumu optimālā mitruma sasniegšanai. No BKV pelnu- šķembu maisījuma ar optimālo mitrumu, izmantojot standarta Proktora metodi (skat. 2.1 nodaļu), izgatavoti paraugi CBR tūlītējas nestspējas, spiedes stiprības un elastības moduļu noteikšanai.



2.2 Attēls BKV pelnu – grants šķembu maisījums

2.1 PROKTORA SABLĪVĒŠANAS TESTS

Šķembu maisījumu Proktora sablīvēšana noteikta saskaņā ar LVS EN 13286-2 „Nesaistītie un hidrauliski saistītie maisījumi. 2. daļa: Laboratorijas atsauces blīvuma un ūdens satura testēšanas metodes. Proktora sablīvēšana”. Standarts attiecas uz nesaistītiem un hidrauliski saistītiem materiāliem, kurus pielieto ceļa segas konstrukcijas būvniecībā.

Šī metode ļauj nesaistītiem un hidrauliski saistītiem paraugiem, sablīvētiem specifiskos apstākļos ar Proktora iekārtu, noteikt sakarību starp ūdens saturu un sauso blīvumu. Iegūtos datus var izmantot, lai noteiktu optimālo maisījuma blīvumu atbilstošā sablīvējuma nodrošināšanai būvobjektā (sasniedzot noteiktu sauso blīvumu).

Pirms testa veikšanas dolomīta un grants šķembu paraugs tika izsijāts cauri 22.4mm sietu, lai atdalīt daļiņas lielākas par 22,4mm. Tas tika veikts, lai izgatavotu paraugu 0/22,4, kurš ir piemērots gan Proktora sablīvēšanas noteikšanai, CBR (California Bearing Ratio) un spiedes stiprības testiem.

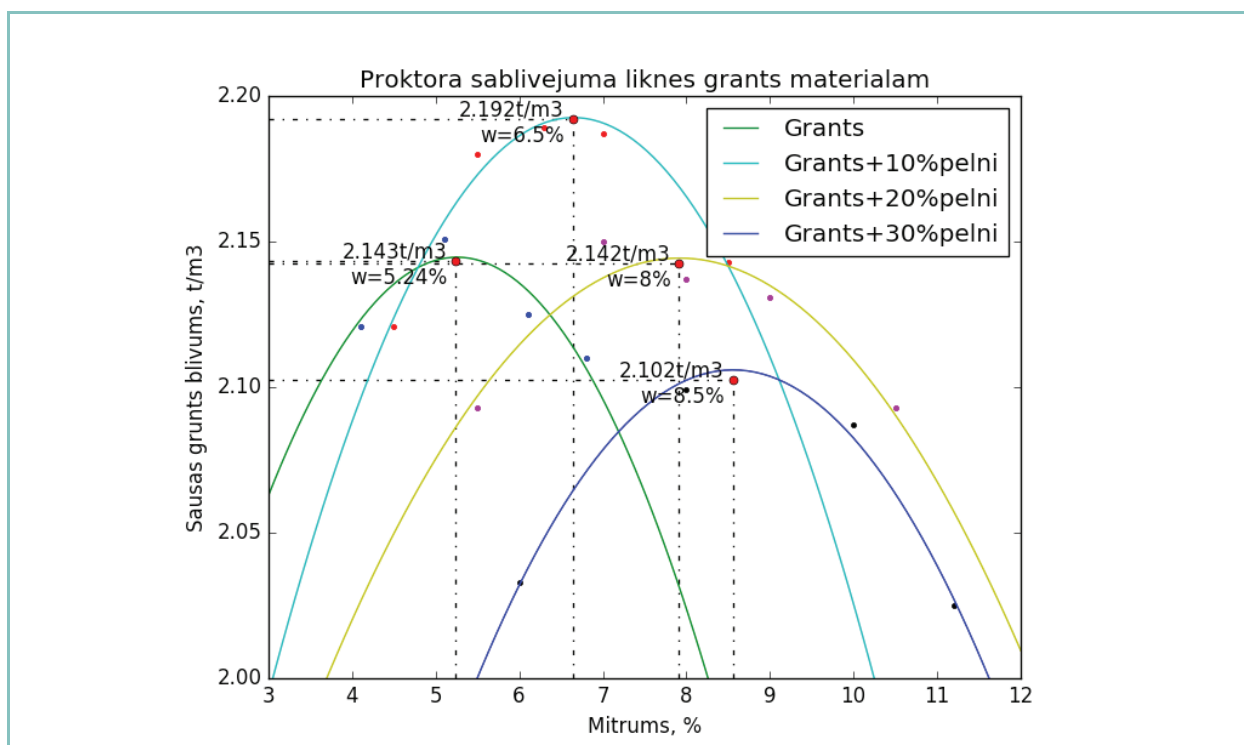
Proktora sablīvēšanas tests veikts izmantojot 2,5kg blieti un Proktora veidni ar diametru 150mm un augstumu 120mm (skat. 2.3 Attēlu). Testēšanas laikā veidnē iepilda paraugu tā, lai sablīvētā veidā tas aizņemtu nedaudz vairāk par 1/3 veidnes augstuma. Ar Proktora blīvēšanas iekārtu izdara 56 sitienus no augstuma 305 mm (skat. 2.4 Attēlu). Atkārtu blīvēšanu vēl divas reizes (veidnes piepildījums 2/3 un 3/3) līdz veidne būs piepildīta un materiāls virspusē būtu aptuveni vienādā augstumā ar veidnes malu. Pēdējās kārtas blīvēšanai lieto tērauda plātni. Paraugu izņem no veidnes, novieto uz paplātes, nosver paplāti ar mitru paraugu un liek visu žāvēties līdz pastāvīgai masai.

**2.3 Attēls Proktora veidne ar augšējo gredzenu**

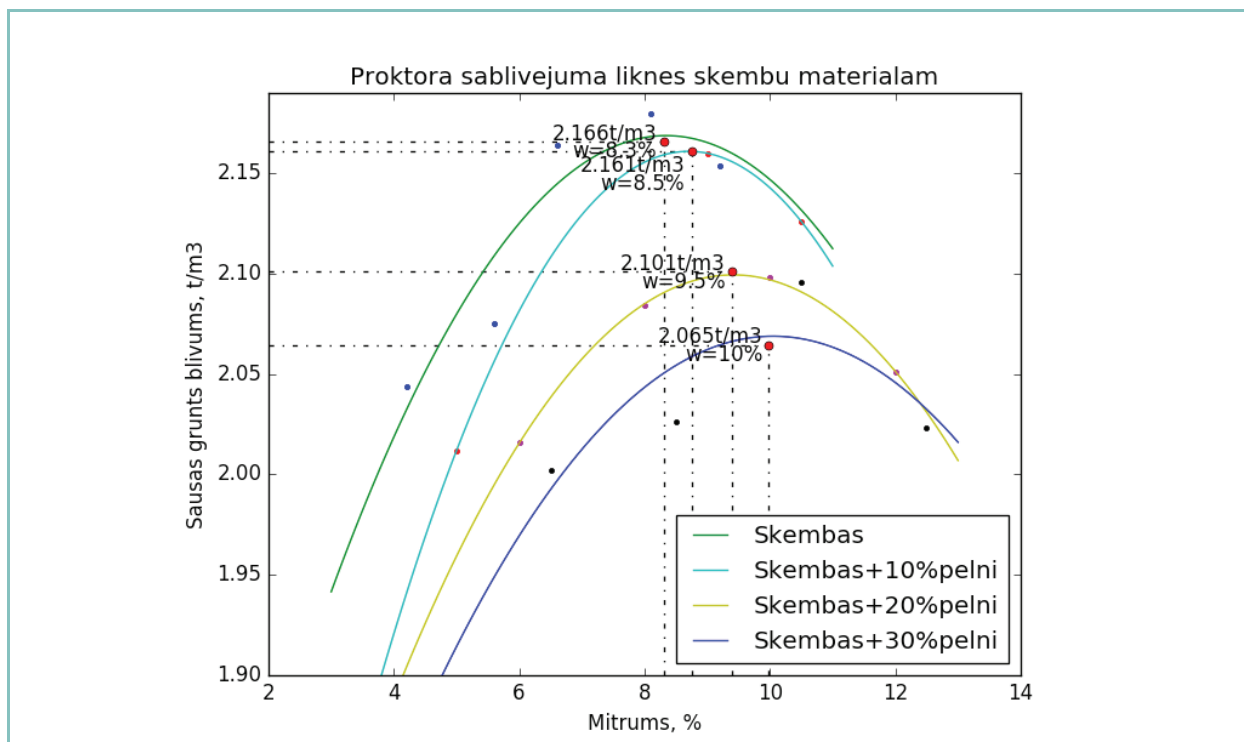
Kopā ar dažādiem mitruma saturiem izgatavo vismaz piecus paraugus. Ūdens saturam jābūt tādā, lai optimālais ūdens saturs, pie kura parādās maksimālais blīvums sausā stāvoklī, atrastos tuvu diapazona vidum. Zinot veidnes tilpumu (nosaka kalibrējot), kā arī parauga masu ar ūdeni un sausu, nosaka paraugu blīvumu mitrā un sausā stāvoklī. Rezultātu attēlo grafiski norādot sausos blīvumus uz Y ass pret atbilstošiem mitruma saturiem uz X ass un nosaka šīs līknes maksimālo punktu (optimālais mitrums un maksimālais blīvums).

**2.4 Attēls Automātiskā Proktora blīvēšanas iekārta.**

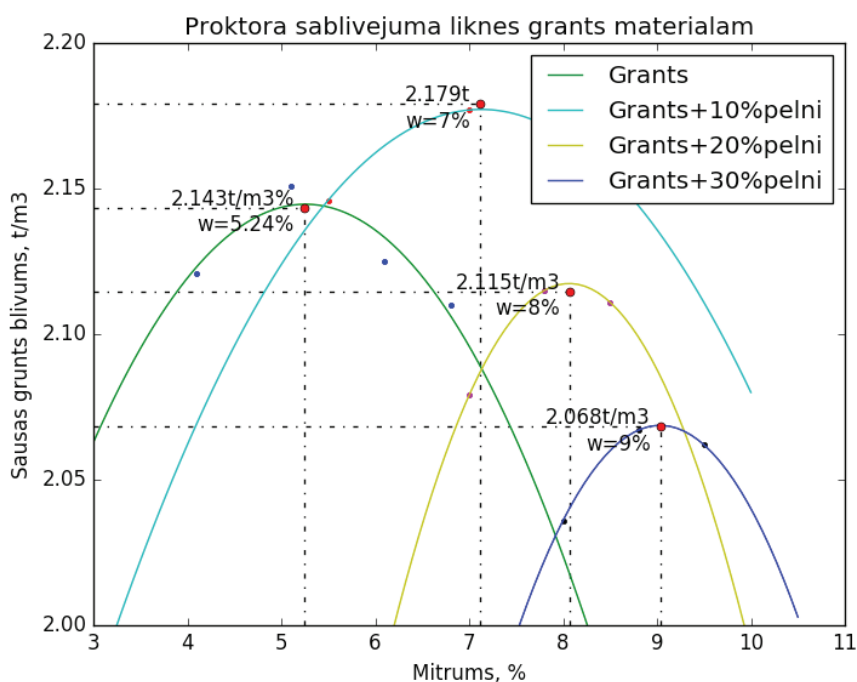
Standarta Proktora testēšanas rezultāti grants šķembu un dolomīta šķembu maisījumiem ar JUL BKV pelniem attēlota 2.5. un 2.6. Attēlā, bet standarta Proktora testēšanas rezultāti grants šķembu un dolomīta šķembu maisījumiem ar JAN BKV pelniem attēlota 2.7. un 2.8. Attēlā.



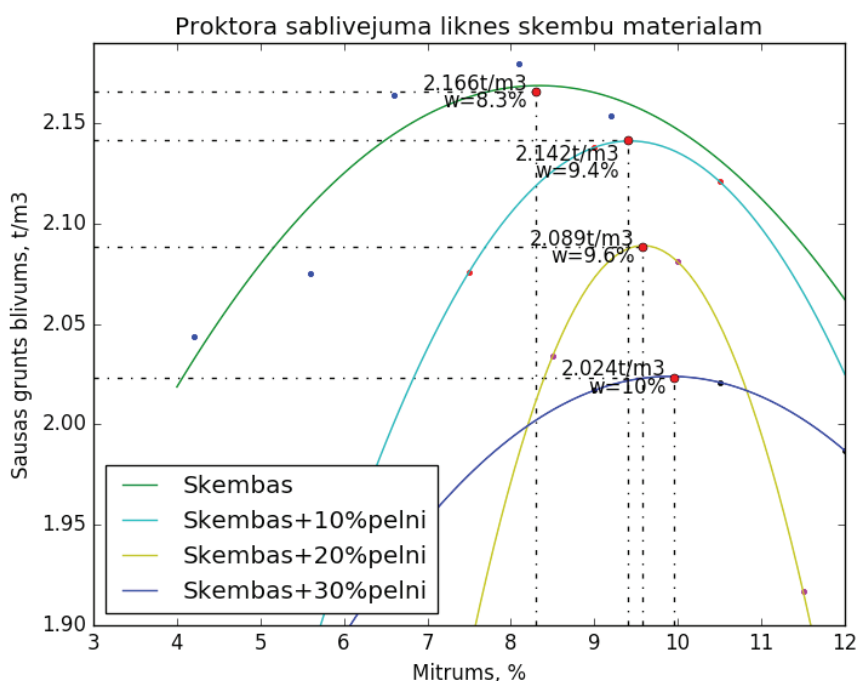
2.5 Attēls Grants šķembu un grants šķembu - JUL BKV pelnu maisījumu sausā blīvuma un mitruma atkarība standarta Proktora testā



2.6 Attēls Dolomīta šķembu un dolomīta šķembu - JUL BKV pelnu maisījumu sausā blīvuma un mitruma atkarība standarta Proktora testā



2.7 Attēls Grants šķembu un grants šķembu - JAN BKV pelnu maisījumu sausā blīvuma un mitruma atkarība standarta Proktora testā



2.8 Attēlā Dolomīta šķembu un dolomīta šķembu - JAN BKV pelnu maisījumu sausā blīvuma un mitruma atkarība standarta Proktora testā

Standarta Proktora testa rezultāti grants šķembām parāda, ka nesaistītam materiālam bez pelniem optimālais mitruma saturs ir 5.24%. 10% BKV pelnu – grants šķembu maisījumam ir visaugstākais optimālais sausas grunts blīvums pie optimālā mitruma satura 6.5%-7.0% gan izmantojot JUL, gan JAN BKV pelnus. Grants šķembu maisījumos ar 20% un 30% BKV pelniem optimālas sausas grunts blīvums samazinās un ir

mazāks par nesaistītas grants optimālo sausas grunts blīvumu, bet optimālais mitruma saturs palielinās - 8% maisījumos ar 20% BKV pelniem un 8.5%-9.0% ar 30% BKV pelniem. Optimālā mitruma pieaugums ir atkarīgs no tūlītējām hidrauliskajām reakcijām, kuru laikā tiek saistīta daļa brīvā ūdens, bet blīvuma samazināšanās palielinoties BKV pelnu proporcijai ir atkarīga no pašu pelnu daļiņu blīvuma, kurš ir mazāks par grunts daļiņu blīvumu.

Standarta Proktora testa rezultāti dolomīta šķembām parāda, ka nesaistītam materiālam bez pelniem optimālais mitruma saturs ir 8.3%. Dolomīta šķembu maisījumos ar 10%, 20% un 30% BKV pelniem optimālas sausas grunts blīvums samazinās un ir mazāks par nesaistītas grants optimālo sausas grunts blīvumu, bet optimālais mitruma saturs palielinās – 8.5%-9.4% maisījumos ar 10% BKV pelniem un 9.5%-9.6% ar 20% BKV pelniem un 10% ar 30% BKV pelniem. Optimālā mitruma pieaugums ir atkarīgs no tūlītējām hidrauliskajām reakcijām, kuru laikā tiek saistīta daļa brīvā ūdens, bet blīvuma samazināšanās palielinoties BKV pelnu proporcijai ir atkarīga no pašu pelnu daļiņu blīvuma, kurš ir mazāks par dolomīta šķembu daļiņu blīvumu.

2.2 pH TESTS

pH ir skaitlis, kas raksturo ūdeņraža jonu koncentrāciju šķīdumā. pH ir ūdeņraža jonu aktivitātes negatīvais logaritms, kas raksturo skābumu un bāziskumu.

$$\text{pH} = -\log_{10} a_{\text{H}^+}$$

Ūdens šķīdumos pH var mainīties no 0 līdz +14. Destilētam/dejonizētam ūdenim pH ir 7 - neitrāls. pH zem 7 nozīmē ka vide ir skāba, virs 7 - ka sārmaina.

pH ir labs indikatīvs lielums, kas nosaka, vai notiks tūlītēja saistvielas – ūdens – grunts saistīšanās, kā arī vai ilglaicīgi attīstīsies puculāna reakcijas. Maisījuma sistēmas pH ir tiešā veidā ietekmē ar stiprības un stinguma ilgtermiņa palielinājumu. Atbilstoši Eades un Grim [19] pH testa, kā arī AS "Latvijas Valsts Ceļi" ceļu specifikāciju metodikai, sasniedzamajam sistēmas pH jābūt >12.4.

2.2.1 PARAUGA SAGATAVOŠANA pH TESTAM

Kopā tika sagatavoti 16 pH testa paraugi – 8 grants šķembu paraugi ar 0%; 10%; 20% un 30% BKV pelniem, izmantojot atsevišķi JUL un JAN BKV pelnus; 8 dolomīta šķembu paraugi ar 0%; 10%; 20% un 30% BKV pelniem, izmantojot atsevišķi JUL un JAN BKV pelnus.

Kolbās tika iesvērti 200g sausas grants vai dolomīta šķembu paraugu, piejaucot attiecīgi 0g, 20g, 40g un 60g BKV pelnu, izmantojot atsevišķi JUL un JAN BKV pelnus. Katrā kolbā tika pievienoti 300ml destilēta/dejonizēta ūdens un viss samaisīts. Pirms pH mērījumu veikšanas, paraugi tika turēti 24 stundas istabas temperatūrā.

2.2.2 pH – METRA KALIBRĒŠANA

pH mērījumi tika veikti ar SARTORIUS PT-15 pārnēsājamo pH/mV/temperatūras mērītāju (skat. 2.9. Attēlu).



2.9. Attēls Sartorius PT-15 pārnēsājamais pH/mV/temperatūras mērītājs

Pirms mērījumu veikšanas, tika veikta 2 punktu kalibrēšana, izmantojot pH 7.00 un pH 4.00 buferšķīdums. pH 7.00 buferšķīdums ir pirmais, kurā jāveic kalibrēšana. Pēc kalibrēšanas tika veikti pH mērījumi, sadalot tos 4 grupās – katrā izmantojot viena tipa grunti un viena tipa BKV pelnus.

2.2.3 pH MĒRĪJUMI

Pirms katra mērījuma, pH-metra sensors tika noskalots ar destilētu ūdeni un iemērkts kolbā ar šķembu – pelnu maisījumu (skat. 2.10. Attēlu), līdz mērījums bija stabils. Šis nolasījums tika pieņemts par katra konkrētā maisījuma pH vērtību.



2.10 Attēls pH mērījums, iemērcot pH-metra elektrodu parauga kolbā.

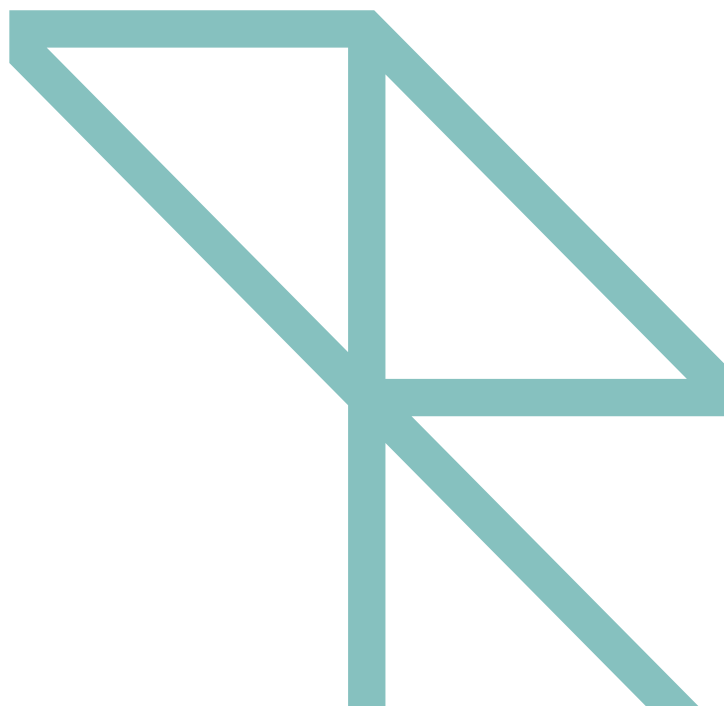
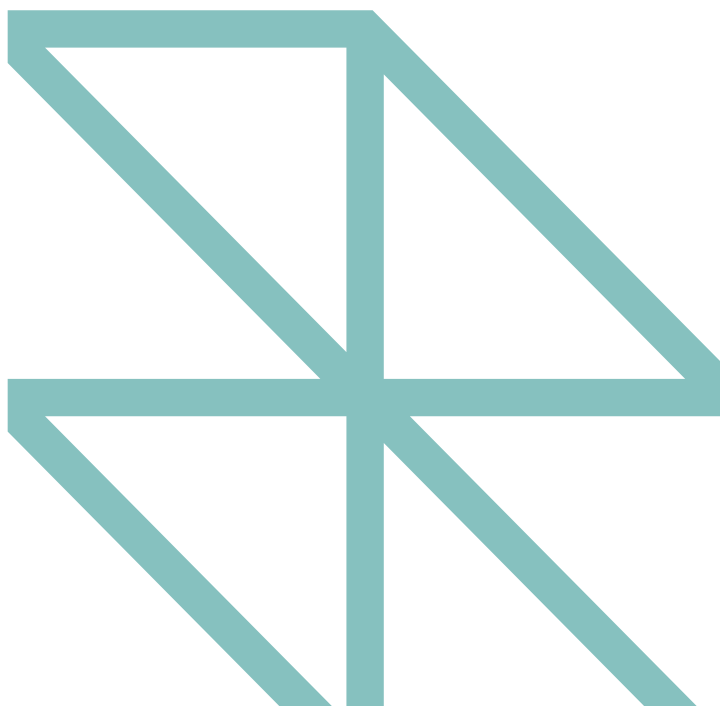
Visi pH mērījumu rezultāti apkopoti 2.1 Tabulā.

2.1 Tabula

pH testa rezultāti.

BKV pelnu % saturs maisījumā	JUL BKV pelni		JAN BKV pelni	
	Grants šķembas	Dolomīta šķembas	Grants šķembas	Dolomīta šķembas
0%	7.15±0.1%	6.76±0.1%	7.16±0.1%	7.80±0.1%
10%	12.55±0.1%	12.52±0.1%	12.62±0.1%	12.68±0.1%
20%	12.63±0.1%	12.65±0.1%	12.74±0.1%	12.73±0.1%
30%	12.73±0.1%	12.77±0.1%	12.80±0.1%	12.82±0.1%

pH testu rezultāti apstiprina, ka gan JUL, gan JAN BKV pelnu paraugi SIA "FORTUM Latvia" koģenerācijas stacijas Jelgavā ir aktīva pucolān-saistviela. Visos šķembu – BKV pelnu maisījumos (10%, 20% un 30%) pH vērtības pārsniedz rekomendēto 12.40 pH, tātad var uzskatīt, ka šādu maisījumu ķīmiskā vide ir labvēlīga gan tūlītējām hidrauliskajām reakcijām, gan arī ilglaicīgajām stabilizējošajām reakcijām, kuras nodrošina stabilizēto šķembu stinguma un stiprības pieaugumu laikā.



3. MEHĀNISKIE TESTI

3.1 TŪLĪTĒJĀS NESTSPĒJAS RĀDĪTĀJS (KALIFORNIJAS NESTSPĒJAS TESTS (CBR))

Šķembu maisījumu Kalifornijas nestspējas rādītājs noteikts saskaņā ar LVS EN 13286-46 "Nesaistītie un hidrauliski saistītie maisījumi. 47.daļa: Kalifornijas nestspējas vērtības, tūlītējās nestspējas indeksa un lineārās izplešanās noteikšanas testēšanas metode". Standarts attiecas uz nesaistītiem un hidrauliski saistītiem materiāliem, kurus pielieto ceļa segas konstrukcijas būvniecībā.

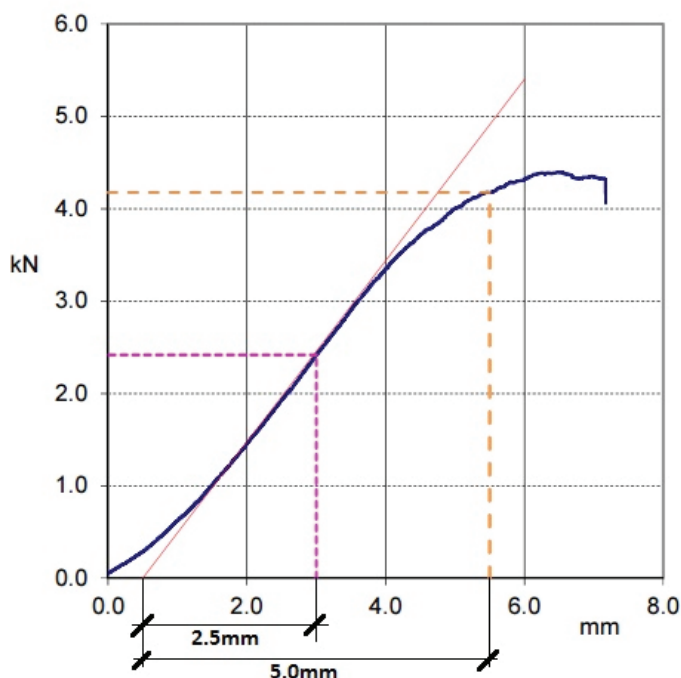
CBR testu izmanto, lai noteiktu ar Proktora metodi sablīvētā materiāla nestspēju. Lai raksturotu nesaistītu un hidrauliski saistītu materiālu nestspēju CBR rādītāju var noteikt uzreiz pēc sablīvēšanas (tūlītējās nestspējas rādītājs (IPI)) un pēc paraugu izturēšanas noteiktos apstākļos (skat. 3.1 Attēlu). CBR tests piemērots minerālmateriālam ar frakciju 0-22.4mm.

CBR metodes pamatā ir spēka noteikšana, kurš nepieciešams, lai standarta izmēra (diametrs 50 ± 5 mm) cilindrisku virzuli iedziļinātu sablīvētā minerālmateriālā. Spiedes iekārtai ar vismaz 50kN jaudu jānodrošina virzuļa iegrimi ar ātrumu $1,27 \pm 0,20$ mm/min (skat. 3.1. Attēlu).



3.1 Attēls CBR tests. CBR iekārta, paraugs testēšanas laikā un paraugs pēc testēšanas

Testēšanas rezultātus attēlo grafiski – uz x ass norāda virzuļa pārvietojumu, bet uz y ass pielikto slodzi (skat. 3.2 Attēlu). No grafika nosaka spēkus, kuri atbilst virzuļa ieegrīmei 2,5 un 5 mm un izsaka tos procentos no references spēku vērtībām 13,2kN un 20kN.



3.2 Attēls CBR testa slodze atkarībā no virzuļa ieegrīmes grafiks un CBR vērtību noteikšana.

3.2 SPIEDES PRETESTĪBAS UN ELASTĪBAS MODUĻA TESTI

Šķembu maisījumu spiedes stiprība noteikta saskaņā ar LVS EN 13286-41 "Nesaistītie un hidrauliski saistītie maisījumi. 41. daļa: Hidrauliski saistītu maisījumu stiprības testēšanas metode". Elastības moduļi noteikti saskaņā ar LVS EN 13286-43 "Nesaistītie un hidrauliski saistītie maisījumi. 43. daļa: Hidrauliski saistītu maisījumu elastības moduļa testēšanas metode". Standarti attiecas uz nesaistītiem un hidrauliski saistītiem materiāliem, kurus pielieto ceļa segas konstrukcijas būvniecībā.

Testu veikšanai, saskaņā ar LVS EN 13286-50 "Nesaistītie un hidrauliski saistītie maisījumi. 50. daļa: Hidrauliski saistītu maisījumu paraugu izgatavošanas metode lietojot sablīvēšanai Proktora iekārtu vai vibrogaldū", izgatavoti cilindriskas formas paraugi ar diametru 150mm un augstumu 120mm. Paraugi izspiesti no veidnēm (skat. 3.3 Attēls) pēc 24 stundām. Paraugi pirms spiedes un elastības moduļa testiem 7 un 28 diennaktis uzglabāti noteiktos apstākļos – ietīti plēvē un uzglabāti $+20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ (skat. 3.3 Attēls). Saskaņā ar LVS EN 12390-1 A pielikumu, izmantojot ģipša saistvielu, veikta testa paraugu virsmas līdzināšana.



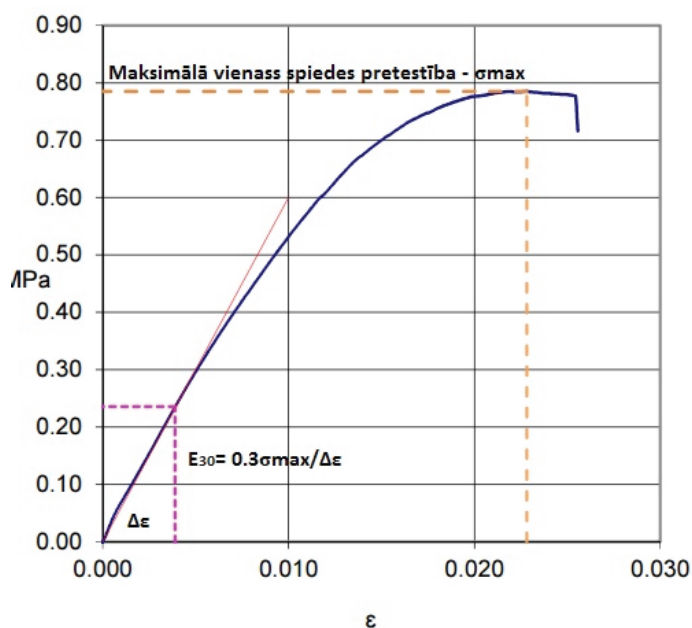
3.3. Attēls Cilindriskie paraugi pēc Proktora blīvēšanas. Izspiešanas no Proktora veidnes, uzglabāšana pirms spiedes stiprības un elastības moduļa testiem, cilindriskā Proktora parauga virsmas līdzināšana

Spiedes testēšanas metodes pamatā ir testa paraugu pakļaušana spiedes spēku iedarbībai līdz tā pilnīgai sabrukšanai. Testēšanas laikā fiksē maksimālo slodzi σ_{max} , ko paraugs spēj izturēt un aprēķina spiedes stiprību. Paraugs tiek slogots vienmērīgi un nepārtraukti, lai plaisas parādītos un paraugs sagrūtu 30s un 60s laikā kopš slogošanas sākuma. Testēšana veikta ar Zwick Z100 universālo testēšanas iekārtu, testējot ar parauga nobīdes ātrumu – 2mm/min un izmantojot LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) sensorus precīzai deformāciju reģistrēšanai (skat. 3.4. Attēlu).



3.4. Attēls Vienass spiedes testa iekārta ar LVDT mērītājiem.

Spiedes stiprību (R_c) nosaka izdalot maksimālo spēku, kuru ir izturējis hidrauliski saistīts testa paraugs uz parauga šķēsgriezuma laukumu. Elastības moduli (E_{30}) nosāka no vienass spiedes stiprības testa reģistrētas spēka-deformācijas līknes punktā 30% no maksimālās spiedes pretestības - σ_{max} . Garenvirziena deformācijas ϵ nosaka izmantojot LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) sensoru un aprēķina kā attiecību starp parauga pārvietojumu jeb absolūtu deformāciju ΔL un parauga augstumu L . No līknes, balstoties uz Huka likumu, nosaka elastības moduli kā sprieguma/deformācijas attiecību (skat. 3. 5. Attēlu).



3.5. Attēls Vienass spiedes testa piemērs. Testēšanas rezultātu noteikšana.

3.3 AR BKV PELNIEM STABILIZĒTO ŠĶEMBU KLASIFIKĀCIJA ATBILSTOŠI TŪLĪTĒJAS NESTSPĒJAS UN VIENASS SPIEDES TESTA REZULTĀTIEM

Hidrauliski saistītu (stabilizēto) šķembu maisījumu klasifikācija veikta saskaņā ar LVS EN 14227-15 "Hidrauliski saistītie maisījumi. Specifikācijas. 15.daļa: Hidrauliski stabilizētas gruntis". Šis standarts attiecas uz minerālmateriāliem stabilizētiem ar cementu, BKV pelniem, kaļķiem, hidraulisku ceļa saistvielu un tēraudkausēšanas sāļiem. Stabilizēto maisījumu klasifikācija pēc tūlītējās nestspējas rādītāja (IPI) un spiedes stiprības (Proktora cilindriskie paraugi) izvēlas baltoties uz tabulās 3.1 un 3.2 norādītām kategorijām.

Tabula 3.1

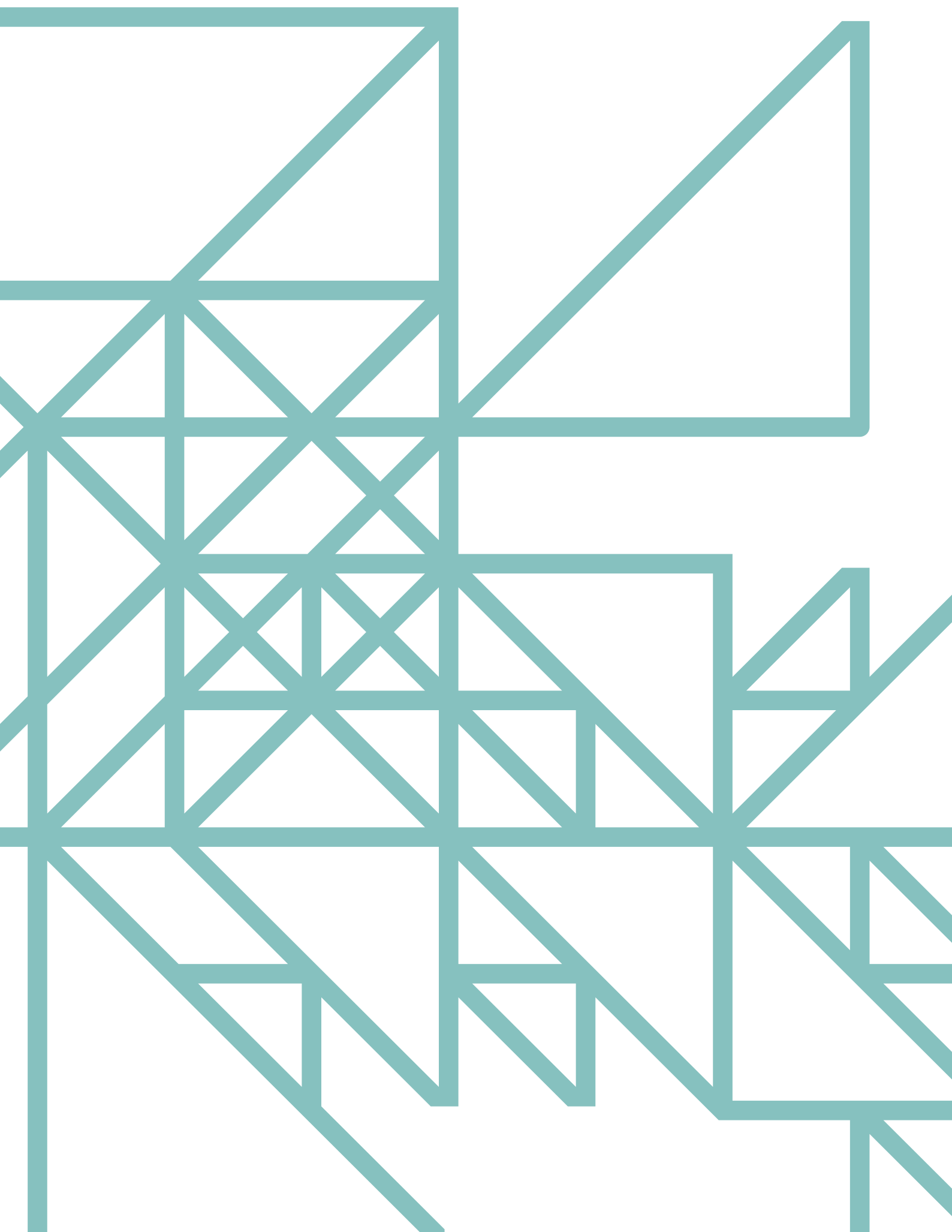
Tūlītējas nestspējas indeksa kategorijas

Tūlītējas nestspējas indekss	Kategorija
≥ 10	IPI_{10}
≥ 15	IPI_{15}
≥ 20	IPI_{20}
≥ 25	IPI_{25}
≥ 30	IPI_{30}
≥ 40	IPI_{40}
≥ 50	IPI_{50}

Tabula 3.2

Spiedes stiprības kategorijas Proktora cilindriskiem paraugiem

Minimālā spiedes stiprība (R_c), MPa	Kategorija
0,2	$C_{0,15/0,2}$
0,5	$C_{0,4/0,5}$
1	$C_{0,8/1}$
1,5	$C_{1,2/1,5}$
2	$C_{1,5/2}$
2,5	$C_{2/2,5}$
3	$C_{2,3/3}$
4	$C_{3/4}$
5	$C_{4/5}$
6	$C_{5/6}$
8	$C_{6/8}$
10	$C_{8/10}$
12	$C_{9/12}$

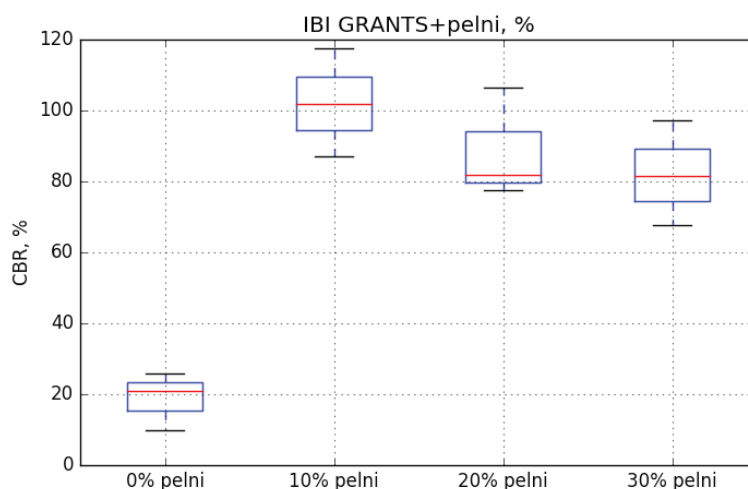


4. TŪLĪTĒJĀS NESTSPĒJAS RĀDĪTĀJA (IPI) TESTA REZULTĀTI

4.1 MAISĪJUMI AR JUL BKV PELNIEM

4.1.1 GRANTS ŠĶEMBAS

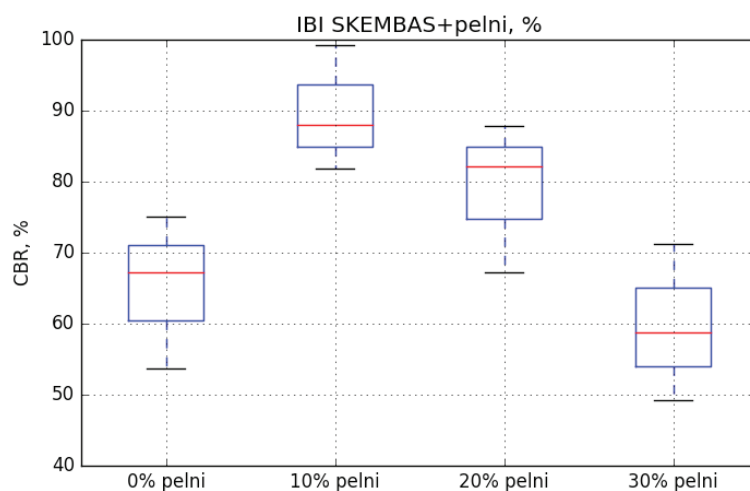
Tūlītējās nestspējas rādītāja (IPI) testēšanas rezultāti grants šķembām un grants šķembu maisījumam ar JUL BKV pelniem Kalifornijas nestspējas testā (CBR) doti 4.1. Attēlā.



4.1. Attēls. Tūlītējās nestspējas rādītāja (IPI) grants šķembām un grants šķembu maisījumam ar JUL BKV pelniem

1.1.2 DOLOMĪTA ŠĶEMBAS

Tūlītējās nestspējas rādītāja (IPI) testēšanas rezultāti dolomīta šķembām un dolomīta šķembu maisījumam ar JUL BKV pelniem Kalifornijas nestspējas testā (CBR) doti 4.2. Attēlā

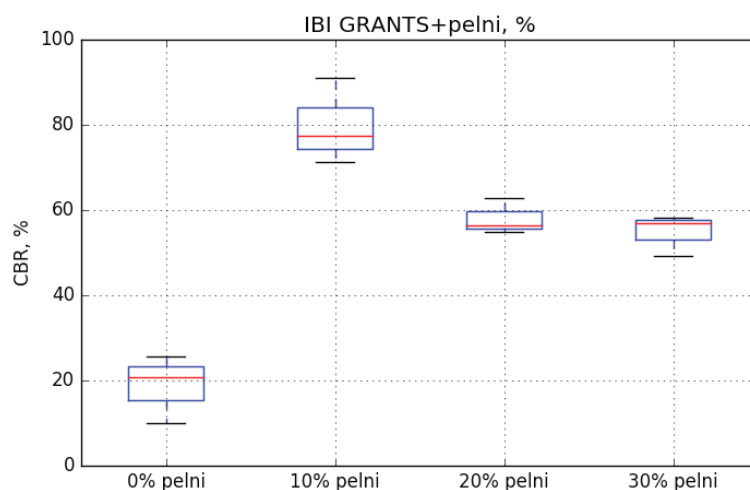


4.2 Attēlā. Tūlītējās nestspējas rādītāja (IPI) dolomīta šķembām un dolomīta šķembu maisījumam ar JUL BKV pelniem

4.2 MAISIJUMI AR JAN BKV PELNIEM

4.2.1 GRANTS ŠĶEMBAS

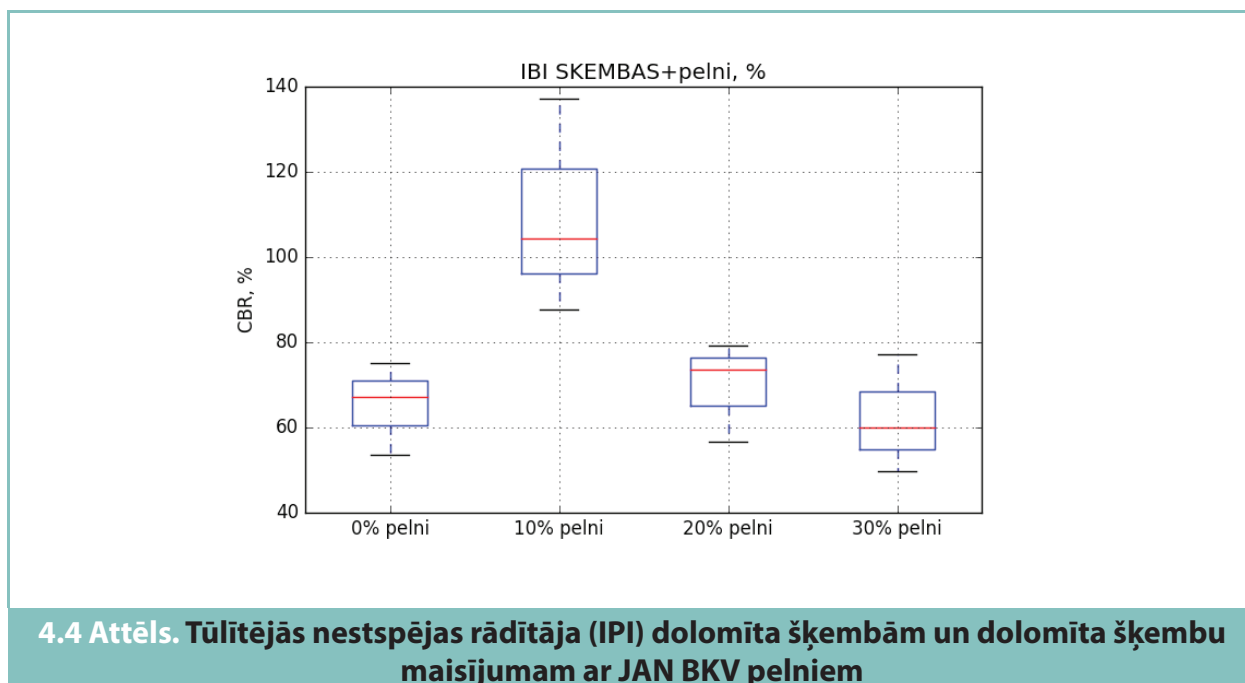
Tūlītējās nestspējas rādītāja (IPI) testēšanas rezultāti grants šķembām un grants šķembu maisījumam ar JAN BKV pelniem Kalifornijas nestspējas testā (CBR) doti 4.3. Attēlā.



4.3 Attēls. Tūlītējās nestspējas rādītāja (IPI) grants šķembām un grants šķembu maisījumam ar JAN BKV pelniem

4.2.2 DOLOMĪTA ŠĶEMBAS

Tūlītējās nestspējas rādītāja (IPI) testēšanas rezultāti dolomīta šķembām un dolomīta šķembu maisījumam ar JAN BKV pelniem Kalifornijas nestspējas testā (CBR) doti 4.4. Attēlā.



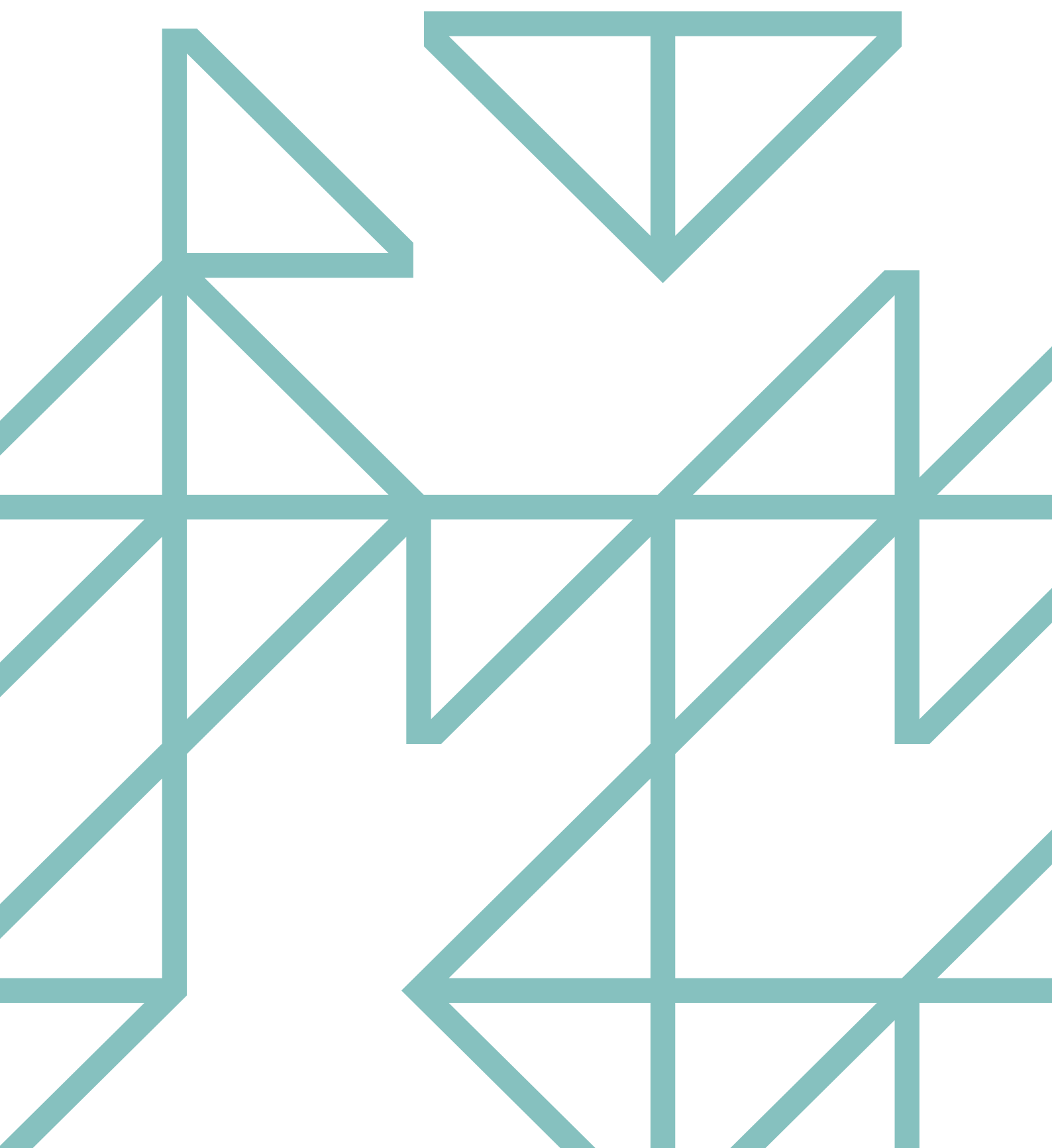
4.2 TŪLĪTĒJĀS NESTSPĒJAS RĀDĪTĀJA (IPI) TESTA REZULTĀTU KOPSAVILKUMS

Attēlos 4.1; 4.2; 4.3 un 4.4 attēloti rezultātu apkopojums un to apstrāde, bet katras paraugu sērijas rezultāti pievienoti 1. pielikumā.

Tūlītējās nestspējas rādītāja (IPI) vērtības grants un grants – BKV pelnu maisījumiem uzrāda līdzīgu tendenci gan JUL, gan JAN BKV pelnu paraugiem – maksimālās IPI vērtības tiek sasniegtas grants – 10% BKV pelnu maisījumiem, kad CBR vērtība nesaistītam materiālam no 20% (CBR) pieaug līdz 80%-100% (CBR). Tātad pieaugums ir 4-5 reizes salīdzinājumā ar nesaistītu grants šķembu materiālu. Grants – 20% un 30% BKV pelnu maisījumiem IPI vērtības samazinās salīdzinājumā ar grants – 10% BKV pelnu maisījumu, bet salīdzinājumā ar nesaistītu materiālu pieaug līdz 60%-80%, tātad 3-4 reizes.

Tūlītējās nestspējas rādītāja (IPI) vērtības dolomīta šķembu un dolomīta šķembu – BKV pelnu maisījumiem uzrāda līdzīgu tendenci gan JUL, gan JAN BKV pelnu paraugiem – maksimālās IPI vērtības tiek sasniegtas dolomīta šķembu – 10% BKV pelnu maisījumiem, kad CBR vērtība nesaistītam materiālam no 65% (CBR) pieaug līdz 90%-100% (CBR). Tātad pieaugums ir 25%-35% salīdzinājumā ar nesaistītu grants šķembu materiālu. Dolomīta šķembu – 20% BKV pelnu maisījumiem IPI vērtības samazinās salīdzinājumā ar grants – 10% BKV pelnu maisījumu, bet salīdzinājumā ar nesaistītu materiālu pieaug līdz 80%, tātad par 15%. Dolomīta šķembu – 30% BKV pelnu maisījumiem IPI vērtības ir viszemākās un samazinās arī salīdzinājumā ar nesaistītu dolomīta šķembu IPI vērtībām, sasniedzot aptuveni 60% (CBR).

Hidrauliski saistītu (stabilizēto) šķembu maisījumus klasificējot saskaņā ar LVS EN 14227-15 pēc tūlītējās nestspējas indeksa vērtībām, visiem maisījumiem $IPI > 50\%(CBR)$, tātad tie klasificējas kā IPI_{50} .

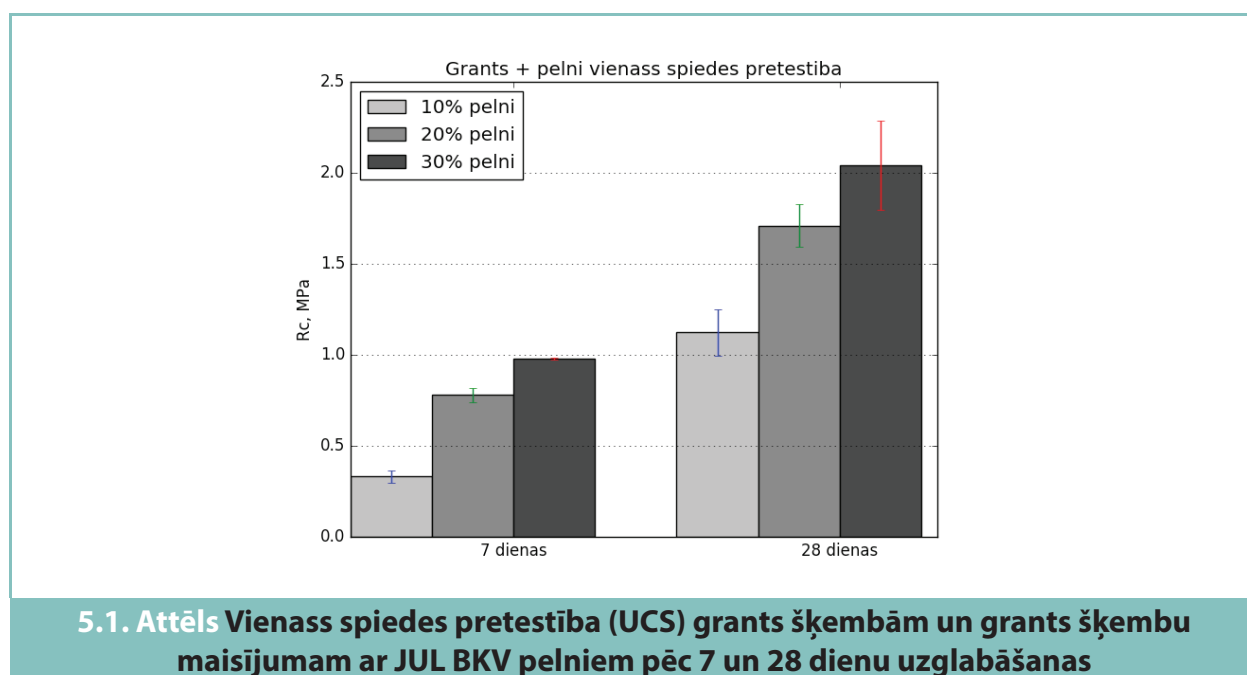


5. VIENASS SPIEDES STIPRĪBAS (UCS) TESTA REZULTĀTI

5.1 MAISĪJUMI AR JUL BKV PELNIEM

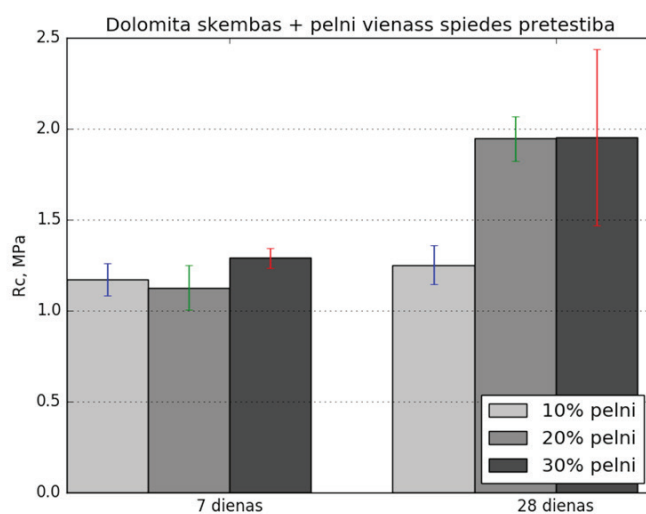
5.1.1 GRANTS ŠĶEMBAS

Vienass spiedes pretestība (UCS) testēšanas rezultāti grants šķembām un grants šķembu maisījumam ar JUL BKV pelniem pēc 7 un 28 dienu uzglabāšanas doti 5.1 Attēlā.



2.1.2 DOLOMĪTA ŠĶEMBAS

Vienass spiedes pretestība (UCS) testēšanas rezultāti dolomīta šķembām un dolomīta šķembu maisījumam ar JUL BKV pelniem pēc 7 un 28 dienu uzglabāšanas doti 5.2. Attēlā.

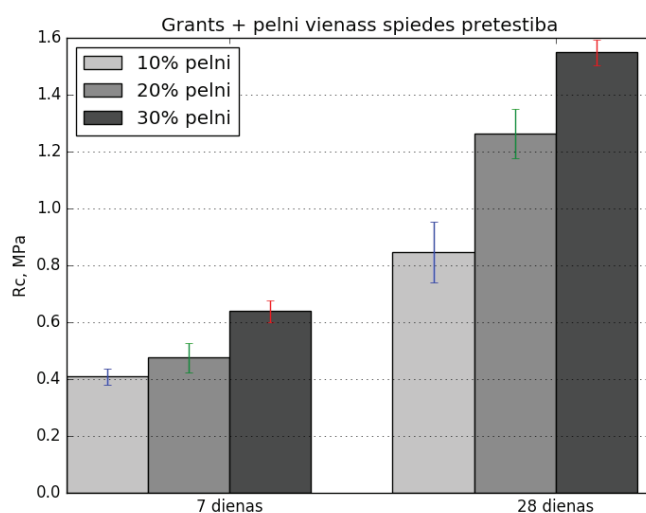


5.2. Attēls Vienass spiedes pretestība (UCS) dolomīta šķembām un dolomīta šķembu maisījumam ar JUL BKV pelniem pēc 7 un 28 dienu uzglabāšanas

5.2MAISĪJUMI AR JAN BKV PELNIEM

5.2.1 GRANTS ŠĶEMBAS

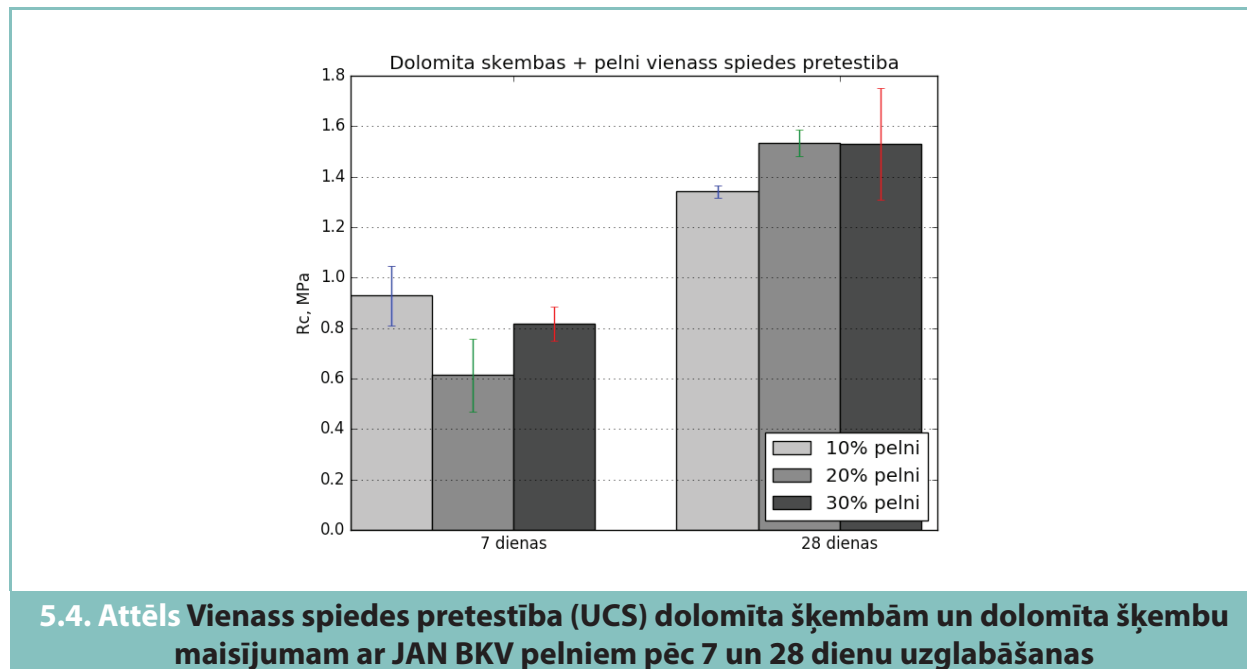
Vienass spiedes pretestība (UCS) testēšanas rezultāti grants šķembām un grants šķembu maisījumam ar JAN BKV pelniem pēc 7 un 28 dienu uzglabāšanas doti 5.3. Attēlā.



5.3. Attēls Vienass spiedes pretestība (UCS) grants šķembām un grants šķembu maisījumam ar JAN BKV pelniem pēc 7 un 28 dienu uzglabāšanas

5.1.2 DOLOMĪTA ŠĶEMBAS

Vienass spiedes pretestība (UCS) testēšanas rezultāti dolomīta šķembām un dolomīta šķembu maisījumam ar JAN BKV pelniem pēc 7 un 28 dienu uzglabāšanas doti 5.4. Attēlā.



5.3 VIENASS SPIEDES PRETESTĪBAS (UCS) TESTA REZULTĀTU KOPSAVILKUMS

Attēlos 5.1; 5.2; 5.3 un 5.4 attēlots rezultātu apkopojums un to apstrāde, bet katras paraugu sērijas rezultāti pievienoti 2. pielikumā.

Vienass spiedes (UCS) vērtības grants šķembu – BKV pelnu maisījumiem uzrāda līdzīgu tendenci gan JUL, gan JAN BKV pelnu paraugiem – palielinoties BKV pelnu saturam (no 10% līdz 30%) un paraugu cietēšanas laikam (no 7 līdz 28 dienām), pieaug arī UCS vērtības. Vidējās vērtības apkopotas 5.1 tabulā.

Tabula 5.1

Vienass spiedes pretestības vidējās vērtības grants šķembu – BKV pelnu maisījumiem pēc 7 un 28 dienu cietēšanas

BKV pelnu saturs	JUL BKV		JAN BKV	
	7 dienas	28 dienas	7 dienas	28 dienas
10%	0.33MPa	1.12MPa	0.41MPa	0.85MPa
20%	0.78MPa	1.71MPa	0.48MPa	1.26MPa
30%	0.98MPa	2.04MPa	0.64MPa	1.55MPa

Vienass spiedes (UCS) vērtības dolomīta šķembu – BKV pelnu maisījumiem 7 dienu UCS vērtības svārstās

no 0.61MPa līdz 1.29MPa, bez izteiktas tendences un neatkarīgi no BKV pelnu satura maisījumā. Savukārt 28 dienu UCS vērtības pieaug salīdzinājumā ar 7 dienu stiprību un arī palielinoties BKV pelnu saturam, taču dolomīta šķembu - 20% un 30% BKV pelnu maisījumu UCS vērtības gandrīz sakrīt un pieaugums nav novērojams. Vidējās vērtības apkopotas 5.2 tabulā.

Tabula 5.2

Vienass spiedes pretestības vidējās vērtības dolomīta šķembu – BKV pelnu maisījumiem pēc 7 un 28 dienu cietēšanas

BKV pelnu saturs	JUL BKV		JAN BKV	
	7dienas	28 dienas	7 dienas	28 dienas
10%	1.17MPa	1.25MPa	0.93MPa	1.34MPa
20%	1.13MPa	1.95MPa	0.61MPa	1.53MPa
30%	1.29MPa	1.95MPa	0.82MPa	1.53MPa

Hidrauliski saistītu (stabilizēto) šķembu maisījumus klasificējot saskaņā ar LVS EN 14227-15 pēc vienass spiedes stiprības Rc vērtībām, atbilstošās klases svārstās no $C_{0,4/0,5}$ līdz $C_{1,5/2,0}$.

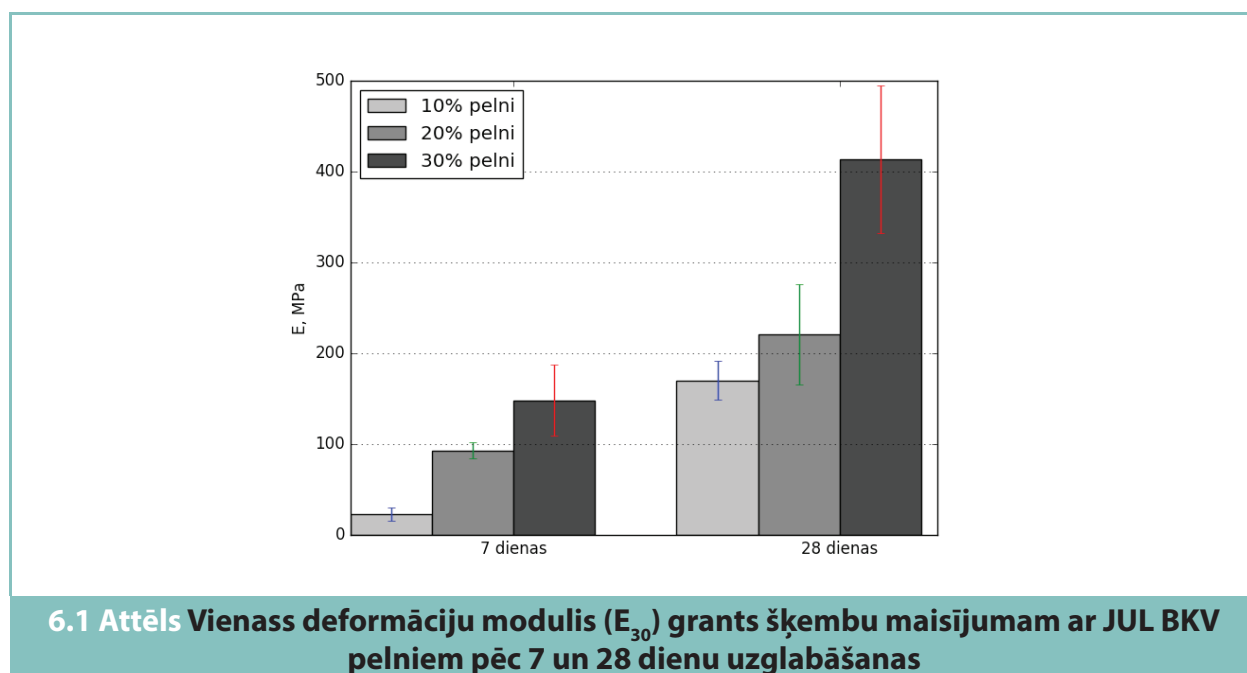


6. VIENASS DEFORMĀCIJAS MODUĻA TESTĒŠANAS REZULTĀTI

6.1 MAISĪJUMI AR JUL BKV PELNIEM

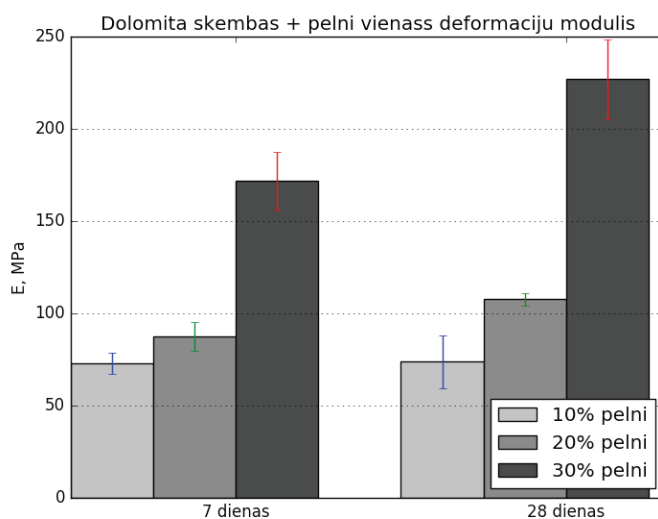
6.1.1 GRANTS ŠĶEMBAS

Vienass deformāciju modulis (E_{30}) testēšanas rezultāti grants šķembu maisījumam ar JUL BKV pelniem pēc 7 un 28 dienu uzglabāšanas doti 6.1. Attēlā.



6.1.2 DOLOMĪTA ŠĶEMBAS

Vienass deformāciju modulis (E_{30}) testēšanas rezultāti dolomīta šķembu maisījumam ar JUL BKV pelniem pēc 7 un 28 dienu uzglabāšanas doti 6.2 Attēlā.

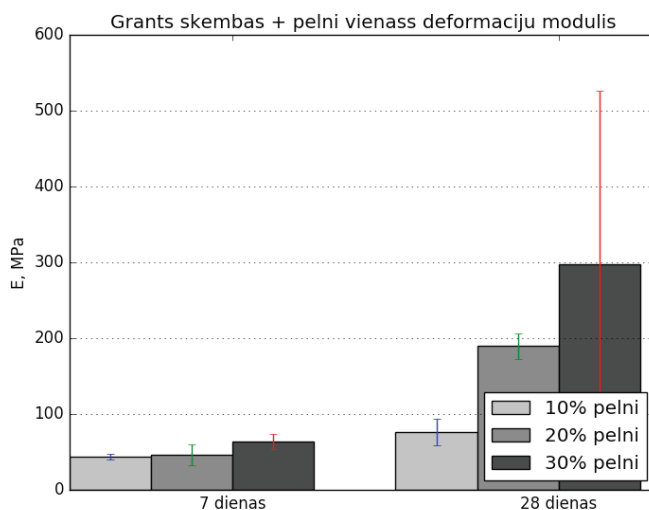


6.2 Attēls Vienass deformāciju modulis (E_{30}) grants šķembām un grants šķembu maisījumam ar JUL BKV pelniem pēc 7 un 28 dienu uzglabāšanas

6.2 MAISIJUMI AR JAN BKV PELNIEM

6.2.1 GRANTS ŠĶEMBAS

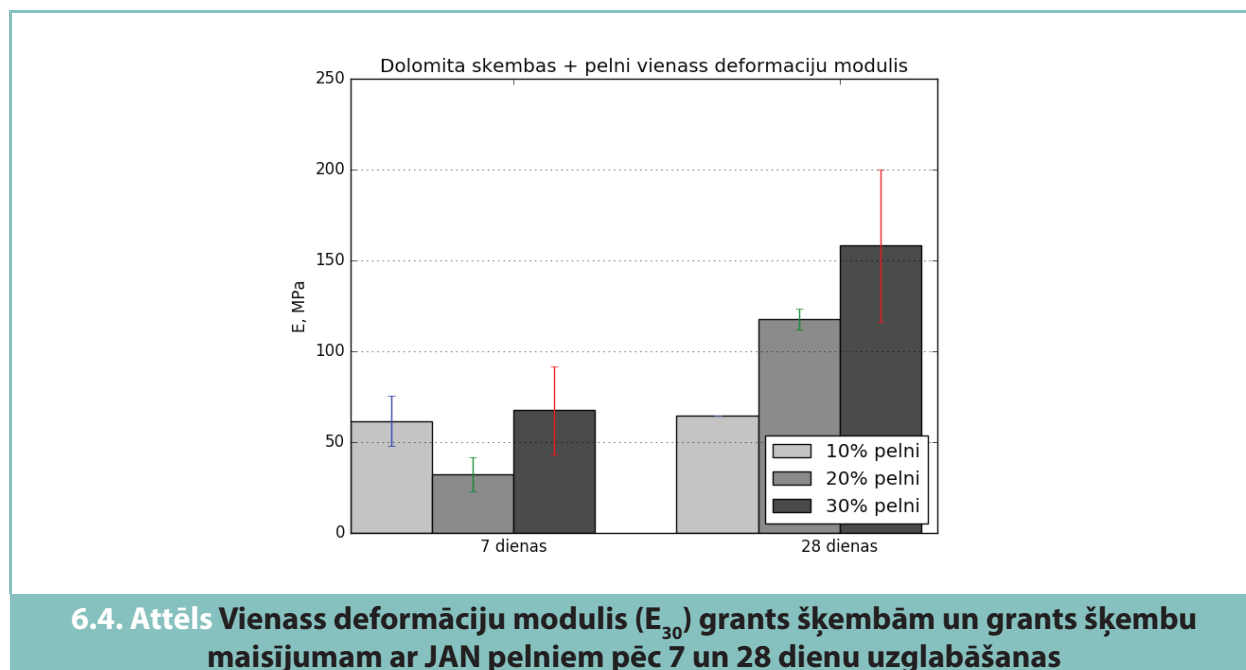
Vienass deformāciju modulis (E_{30}) testēšanas rezultāti grants šķembu maisījumam ar JAN BKV pelniem pēc 7 un 28 dienu uzglabāšanas doti 6.3. Attēlā.



6.3. Attēls Vienass deformāciju modulis (E_{30}) grants šķembu maisījumam ar JAN BKV pelniem pēc 7 un 28 dienu uzglabāšanas

6.2.2 DOLOMĪTA ŠĶEMBAS

Vienass deformāciju modulis (E_{30}) testēšanas rezultāti dolomīta šķembu maisījumam ar JAN BKV pelniem pēc 7 un 28 dienu uzglabāšanas doti 6.4 Attēlā.



6.3 VIENASS DEFORMĀCIJU MODUĻA TESTA REZULTĀTU KOPSAVILKUMS

Attēlos 6.1; 6.2; 6.3 un 6.4 attēlots rezultātu apkopojums un to apstrāde, bet katras paraugu sērijas rezultāti pievienoti 2. pielikumā.

Vienass deformāciju moduļa (E_{30}) vērtības grants šķembu – BKV pelnu maisījumiem uzrāda līdzīgu tendenci gan JUL, gan JAN BKV pelnu paraugiem – palielinoties BKV pelnu saturam (no 10% līdz 30%) un paraugu cietēšanas laikam (no 7 līdz 28 dienām), pieaug arī E_{30} vērtības. Vidējās vērtības apkopotas 6.1 tabulā.

Tabula 6.1

Vienass deformāciju moduļa vidējās vērtības grants šķembu – BKV pelnu maisījumiem pēc 7 un 28 dienu cietēšanas

BKV pelnu saturs	JUL BKV		JAN BKV	
	7 dienas	28 dienas	7 dienas	28 dienas
10%	22.57MPa	170.16MPa	43.86MPa	76.43MPa
20%	93.09MPa	221.05MPa	46.59MPa	189.84MPa
30%	148.32MPa	413.75MPa	63.19MPa	297.89MPa

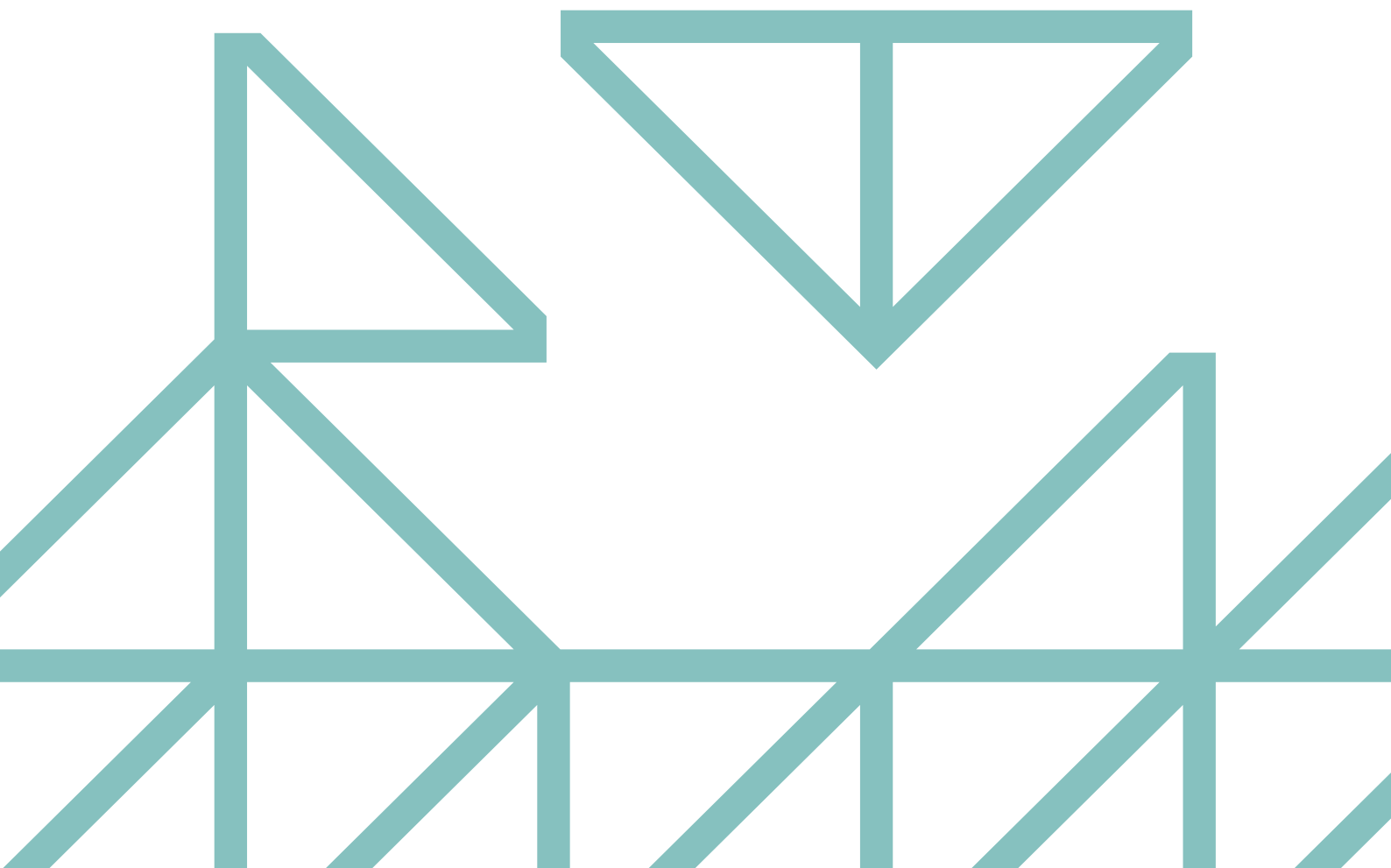
Vienass deformāciju moduļa (E_{30}) vērtības dolomīta šķembu – BKV pelnu maisījumiem gan ar JUL, gan JAN BKV pelnu paraugiem pieaug palielinoties BKV pelnu saturam maisījumā, tomēr JAN 20% BKV pelnu

paraugiem pēc 7 dienu cietēšanas E_{30} samazinājās un sasniedz vismazāko vērtību, salīdzinot ar visiem citiem paraugiem. Dolomīta šķembu – BKV pelnu maisījumiem deformāciju moduļa vērtības tādos pašos apstākļos sagatavotiem paraugiem bija zemākās nekā grants šķembu – BKV pelnu paraugiem. Vidējās vērtības apkopotas 6.2 tabulā.

Tabula 6.2

Vienass deformāciju moduļa vidējās vērtības gants šķembu – BKV pelnu maisījumiem pēc 7 un 28 dienu cietēšanas

BKV pelnu saturs	JUL BKV		JAN BKV	
	7dianas	28 dienas	7 dienas	28 dienas
10%	72.90MPa	74.21MPa	61.57MPa	64.48MPa
20%	87.62MPa	107.60MPa	32.34MPa	117.71MPa
30%	171.79MPa	226.85MPa	67.60MPa	158.13MPa



SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS

1. Šajā pētījuma etapā izmantoto BKV pelnu ķīmiskā sastāva testēšanas rezultāti (BKV pelnu paraugi ņemti JUL un JAN), salīdzinājumā ar 1. etapā testētajiem (BKV pelnu paraugi ņemti 2015. gada novembris, 2015. gada decembris un 2016. gada janvāris), uzrāda neredz augstāku SiO_2 un $\text{R}_2\text{O}_3(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ saturu, bet neredz zemāku CaO saturu un hidrauliskuma moduli. Lai gan izmaiņas ķīmiskajā sastāvā starp dažādos laikos paņemtiem BKV pelnu paraugiem var sasniegt vairāk kā 15%, hidrauliskuma modulis ir aptuveni 2.0 un CaO saturs ir vismaz 20%, tādej var apgalvot, ka pētījuma etapos izmantoto BKV pelnu paraugu ķīmisko testu rezultāti uzrāda, ka BKV pelni ir stipri hidrauliska saistviela un aktīvs pucolāna materiāls, tie atbilstoši LVS EN 14227-4 standartam klasificējami kā kalcifilie (calcareus) pelni.
2. Pētījumam izvēlēts divu veidu minerālmateriāls – 0/45 frakcijas dolomīta un grants šķembas, kuru parasti izmanto seguma izbūvei tipiskajā meža ceļa konstrukcijā. Veicot izvēlēta materiāla atbilstības novērtējumu atbilstoši MAC 2011 prasībām, noskaidrots, ka dolomīta un grants šķembru granulometriskais sastāvs atbilst specifikācijās reglamentētajām robežām (MAC 2011 p.8.3.1 un MAC 2011 p.8.2).
3. Sakarības starp ūdens saturu un sauso blīvumu noteikšanai izvēlēta Proktora sablīvējuma metode, jo iegūtos datus var izmantot, lai noteikt optimālo maisījuma blīvumu atbilstošā sablīvējuma nodrošināšanai būvobjektā. Proktora sablīvējuma testa rezultāti grants šķembām parāda, ka nesaistītam materiālam bez pelniem optimālais mitruma saturs ir 5.24%, bet pievienojot BKV pelnus optimālā mitruma saturs pieaug līdz 9%. Tomēr grants – BKV pelnu maisījumos ar 20% un 30% optimālas sausas grunts blīvums samazinās un ir mazāks par nesaistītas grants optimālo sausas grunts blīvumu. Tas izskaidrojams ar tūlītējām hidrauliskajām reakcijām, kuru laikā tiek saistīta daļa brīvā ūdens, savukārt sausas grunts blīvuma samazināšanās izskaidrojama ar to, ka BKV pelnu daļiņu blīvums ir mazāks par grunts daļiņu blīvumu. Proktora sablīvējuma testa rezultāti dolomīta šķembām parāda līdzīgas tendences kā grants – BKV pelnu maisījums - pievienojot BKV pelnus optimālā mitruma saturs pieaug līdz 10% un samazinās optimālas sausas grunts blīvums.
4. Tūlītējas saistvielas – ūdens – šķembru saistīšanās un pucolāna reakcijas attīstības novērtēšanai izvēlēta Eades un Grim metode pH noteikšanai. Noskaidrots, ka atbilstoši AS "Latvijas Valsts ceļi" Ceļu specifikācijas 2017 metodikai, sasniedzamajam pH jābūt >12.4 pH. Testu rezultāti apstiprina, ka BKV pelnu paraugi no SIA Fortum Latvia koģenerācijas stacijas Jelgavā ir aktīva pucolān-saistviela. Visos šķembru – BKV pelnu maisījumos (10%, 20% un 30%) pH vērtības pārsniedz rekomendēto 12.40 pH. Līdz ar to var uzskatīt, ka šādu maisījumu ķīmiskā vide ir labvēlīga gan tūlītējām hidrauliskajām reakcijām, gan arī ilglaicīgajām stabilizējošajām reakcijām, kas nodrošina stabilizēto šķembru stinguma un stiprības pieaugumu laikā.
5. Analizējot ar CBR testēšanas metodi noteiktu Proktora paraugu tūlītējās nestspējas rādītāju (IPI) noskaidrots, ka maksimālās IPI vērtības tiek sasniegtas grants – 10% BKV pelnu maisījumiem (ar abiem pelnu paraugiem). Rezultāti rāda, ka šķembru maisījumiem, stabilizētiem ar BKV pelniem, CBR vērtība pieaug 4-5 reizes no 20% nestabilizētam līdz 100% ar BKV pelniem stabilizētam grants šķembru maisījumam.
6. Tūlītējās nestspējas IPI vērtības dolomīta šķembru un dolomīta šķembru – BKV pelnu maisījumiem uzrāda līdzīgu tendenci kā grants šķembru un grants šķembru – BKV maisījumiem. Maksimālās IPI vērtības tiek

sasniegtas dolomīta šķembu – 10% BKV pelnu maisījumiem. CBR vērtība pieaug par 25-35% no 65% nestabilizētam līdz 90%-100% ar BKV pelniem stabilizētam dolomīta šķembu maisījumam. Dolomīta šķembu – 20% un 30% BKV pelnu maisījumiem IPI vērtības, salīdzinājumā ar grants - 10% BKV pelnu maisījumu, ir zemākas. Noskaidrots, ka dolomīta šķembu – 30% BKV pelnu maisījumiem IPI vērtības ir viszemākās un samazinās arī salīdzinājumā ar nesaistītu dolomīta šķembu IPI vērtībām, sasniedzot aptuveni 60% (CBR).

7. Atbilstoši LVS EN 14227-15 visi maisījumi klasificējas kā IPI_{50} , jo $IPI > 50\%$ (CBR). Salīdzinājumā ar hidrauliski nesaistītām šķembām, tūlītējās nestspējas vērtības (IPI) ar BKV pelniem stabilizētām šķembām ievērojami palielinās. Tas nozīmē, ka tiek uzlabota mežu ceļa seguma materiāla iestrādājamības īpašības, izmantojot ar BKV pelniem stabilizētas šķembas. Īpaši izteikts tūlītējās nestspējas rādītāja (IPI) pieaugums ir grants šķembām.
8. Analizējot vienas spiedes (UCS) testa rezultātus grants šķembu – BKV pelnu maisījumiem noskaidrots, ka palielinoties BKV pelnu saturam (no 10% līdz 30%) un paraugu cietēšanas laikam (no 7 līdz 28 dienām) pieaug UCS vērtības. Rezultāti uzrāda līdzīgas tendence ar abiem BKV pelnu paraugiem (JUL un JAN BKV pelnu paraugi).
9. Vienas spiedes (UCS) vērtības dolomīta šķembu – BKV pelnu maisījumiem 7 dienu UCS vērtības ir no 0.61 MPa līdz 1.29 MPa, bet 28 dienu UCS vērtības pieaug līdz 2,04 MPa. Rezultāti rāda, ka dolomīta šķembu – 20% un 30% BKV pelnu maisījumu UCS vērtības ir līdzīgas un pieaugums nav novērojams.
10. Atbilstoši LVS EN 14227-15 stabilizēto maisījumu spiedes stiprības klases ir no C0.4/0.5 līdz C1.5/2.0. Ņemot vērā gan tūlītējās nestspējas rādītāja vērtības, gan vienas spiedes stiprību (UCS), tiek rekomendēts izmantot 20% BKV pelnu – šķembu maisījumu meža ceļu seguma izbūvei.
11. Analizējot vienas deformāciju moduļa (E_{30}) vērtības grants šķembu – BKV pelniem noskaidrots, ka palielinoties BKV pelnu saturam (no 10% līdz 30%) un paraugu cietēšanas laikam (no 7 līdz 28 dienām), pieaug E_{30} vērtības. Rezultāti uzrāda līdzīgas tendence ar abiem BKV pelnu paraugiem (JUL un JAN BKV pelnu paraugi).
12. Vienas deformāciju moduļa (E_{30}) vērtības dolomīta šķembu – BKV pelnu maisījumiem pieaug palielinoties BKV pelnu saturam maisījumā, tomēr JAN 20% BKV pelnu – dolomīta šķembu maisījumam pēc 7 dienu cietēšanas E_{30} samazinājās un sasniedz vismazāko vērtību, salīdzinot ar visiem citiem paraugiem. Dolomīta šķembu – BKV pelnu maisījumiem deformāciju moduļa vērtības vienādos apstākļos sagatavotiem paraugiem ir zemākās nekā grants šķembu – BKV pelnu paraugiem.
13. Lai novērtētu 20% BKV pelnu – šķembu maisījuma efektivitāti, ir nepieciešams izbūvēt pilotprojektu, kur varētu salīdzināt 20% BKV pelnu – šķembu maisījumu izbūvētu meža ceļa segumu ar hidrauliski nesaistītām šķembām izbūvētu meža ceļa segumu vienādos apstākļos.
14. Šī pētījuma ietvaros nav apskatīta ar BKV pelniem stabilizēto šķembu salturība, kā arī iespējamā citu saistvielu (piemēram, cements) pievienošana maisījumā, tādā veidā aktivizējot hidratācijas reakcijas un vēl vairāk uzlabojot šķembas. Turpmāk būtu vajadzīgs šos apstākļus ievērtēt. Salturību varētu novērtēt iespējamā pilotprojekta laikā, kā arī laboratorijas apstākļos.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] Atjaunojamo energoresursu patēriņš pēdējos desmit gados pieauga par 12% [tiešsaiste] (2015). Centrālās statistikas pārvalde, Latvija [Skatīts 2016. g. 23.oktobrī]. Pieejams: <http://www.csb.gov.lv/notikumi/atjaunigo-energoresursu-paterins-pedejos-desmit-gados-pieauga-par-12-41874.html>;
- [2] Bohrn, G.; Stampfer, K. 2014. Untreated wood ash as a structural stabilizing material in forest roads [online]. Vienna, Austria [Skatīts 2017. g. 11. februārī]. Pieejams: http://www.crojfe.com/r/i/crojfe_35-1_14/bohrn.pdf
- [3] Bjurström, H.; and Herbert, R. 2009. The Swedish ash programme 2002-2008. Biomass, wastes, peat - any solid fuel but coal. Project number Q6-670. A synthesis of the ash programme in English. VÄRMEFORSK Service AB.
- [4] Lahtinen, P.; Jyrävä, H.; Maijala, A.; Mácsik, J. 2005a. Flygas-kor som bindemedel för stabilisering av grusmaterial [Fly ashes as binders for the stabilisation of gravel. Laboratory tests and preparation for a field test]. Värmeforsk Report 918, Stockholm (in Swedish).
- [5] Lahtinen, P.; Maijala, A.; Mácsik, J. 2005b. Produkter baserade på blandningar av flygaska och fiberslam (fiberaskor) för vägbyggnad [Products based on the mixes of fly ashes and fibre sludge (fiber-ashes) for road construction]. Värmeforsk Report 915, Stockholm (in Swedish).
- [6] Mácsik, J.; Svedberg, B. 2006. Skogsbilvägsrenovering av Ehnsjövägen, Hallstavik [Gravel road stabilisation of Ehnsjövägen, Hallstavik]. Värmeforsk Report 968, Stockholm (in Swedish).
- [7] Mácsik, J.; Erlandsson, Å.; Wexell, B.-A. 2009. Flygaska-grönlutslamstabiliserad skogsbilväg –Fallstudie Iggesund [Fly ash and green liquor as binder in gravel road stabilization –Pilot study at Iggesund]. Värmeforsk Report 1101, Stockholm (in Swedish).
- [8] Mácsik, J.; Edeskär, T.; Rogbeck, Y.; Ribbing, C. 2012. Stabilization of road structures with fly ash as binder component: through demo projects to full scale use, in Ash Utilisation 2012, 25-27 January 2012, Stockholm, Sweden.
- [9] Mácsik, J.; Svedberg, B.; Lenströmer, S.; Nilsson, T. 2004. FACE – Flygaska i geotekniska anläggningar. Etapp 1: inventering/tillämplighet [FACE – Fly ash in civil engineering Stage 1: inventory/application]. Värmeforsk Report 870, Stockholm (in Swedish).
- [10] Supancic, K.; Odernberger, I. 2012. Wood ash utilization as a binder in soil stabilization for road construction – first results of large-scale tests [online]. Graz, Austria, [Skatīts 2017. g. 11. februārī]. Pieejams: <http://www.bios-bioenergy.at/uploads/media/Paper-Supancic-Ash-Utilizationin-Road-Construction-2011-06-06.pdf>
- [11] Svedberg, B.; Ekdahl, P.; Mácsik, J.; Maijala, A.; Lahtinen, P.; Hermansson, Å.; Knutsson, S.; Edeskär, T. 2008; FUD Sala, Provsträcka med stabilisering av obundna lager [FUD Sala – stabilization of unbound layers on a road section]. Värmeforsk Report 1055, Stockholm (in Swedish).
- [12] Vanhanen, H.; Dahl, O.; Joensuu, S. 2014. Utilization of wood ash as a road construction material - Sustainable use of wood ashes. Sustainable Environment Research 24(6): 457-465.
- [13] Vestin, J.; Arm, M.; Nordmark, D.; Lagerkvist, A.; Hallgren, P.; Lind, B. 2012. Fly ash as a road construction material, in Proceedings of WASCON 2012 – Towards Effective, Durable and Sustainable Production and Use of Alternative Materials in Construction. International Conference on Sustainable Management of Waste and Recycled Materials in Construction. 30 May – 1 June 2012, Gothenburg, Sweden.
- [14] Lahtinen, P., (2001). Fly Ash Mixtures as Flexible Structural Materials for Low-Volume Roads. Finnish Road Administration, Helsinki, Finland;

- [15] Brännvall, E. (2013). Suitability of fly ash for construction and land applications. Luleå: Luleå tekniska universitet. (Doctoral thesis / Luleå University of Technology);
- [16] Ronkainen, M.; Pototski, A.; Puhkim, H.; Lahtinen, P.; Niemelin, T. (2013). OSAMAT – Utilisation of Oil Shale Ashes in Road Construction. In: The XXVIII International Baltic Road Conference: The XXVIII International Baltic Road Conference, Vilnius, Lithuania, 26-28 August 2013. Vilnius, Lithuania;
- [17] von Bahr, B., Ekvall, A. and Schouenborg, B. (2004); Kvalitetskriterier för bottenaskor till väg- och anläggningsbyggnad – Etapp I, inventering av provmetoder och funktionskrav, ("Quality criteria for ashes for roads and civil construction – Part I – survey of test methods and functional criteria") (in Swedish), Värmeforsk report 867, Stockholm;
- [18] Kolisoja, P 2013, Mode 2 Rutting Design Approach : Description of the new ROADDEX design approach for Mode 2 rutting on low volume roads. ROADDEX Implementing Accessibility, Research Report, ROADDEX Project;
- [19] Eades, J.L.; Grim, R.E. 1966. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. Department of Geology, University of Illinois, U.S.A

LVS EN 13286-2, „Nesaistītie un hidrauliski saistītie maisījumi. 2. daļa: Laboratorijas atsauces blīvuma un ūdens satura testēšanas metodes. Proktora sablīvēšana”

LVS EN 13286-41 „Nesaistītie un hidrauliski saistītie maisījumi. 41. daļa: Hidrauliski saistītu maisījumu stiprības testēšanas metode”

LVS EN 13286-43 „Nesaistītie un hidrauliski saistītie maisījumi. 43. daļa: Hidrauliski saistītu maisījumu elastības moduļa testēšanas metode”

LVS EN 13286-46 „Nesaistītie un hidrauliski saistītie maisījumi. 47. daļa: Kalifornijas nestspējas vērtības, tūlītējās nestspējas indeksa un lineārās izplešanās noteikšanas testēšanas metode”

LVS EN 13286-50 „Nesaistītie un hidrauliski saistītie maisījumi. 50. daļa: Hidrauliski saistītu maisījumu paraugu izgatavošanas metode lietojot sablīvēšanai Proktora iekārtu vai vibrogaldus”

LVS EN 12390-1 „Societējuša betona testēšana. 1. daļa: Testa paraugu un veidņu forma, izmēri un citas prasības”

LVS EN 14227-4 „Hidrauliski saistītie maisījumi - Specifikācijas - 4. daļa: Hidrauliski saistīto maisījumu izmešu pelni”

LVS EN 14227-15 „Hidrauliski saistītie maisījumi. Specifikācijas. 15. daļa: Hidrauliski stabilizētas gruntis”

LVS EN 933-1 „Minerālo materiālu ģeometrisko īpašību testēšana. 1. daļa: Daļiņu izmēra sadalījuma noteikšana. Sijāšanas metode”

LVS EN 932-2 „Minerālo materiālu vispārējo īpašību testēšana - 2. daļa: Laboratorijas paraugu samazināšanas metodes”

Meža autoceļu būvniecības specifikācijas, 2011. [tiešsaiste], AS „Latvijas Valsts meži”, Rīga, 2011 [Skatīts 2017. g. 11. februārī].

Pieejams: http://www.lvm.lv/images/lvm/Profesionaliemi/Infrastrukt%C5%ABra/L%C4%ABgumu_pielikumi/MAC_b%C5%ABv_spec_2011_ar_groz%C4%ABjumiem_2013.pdf

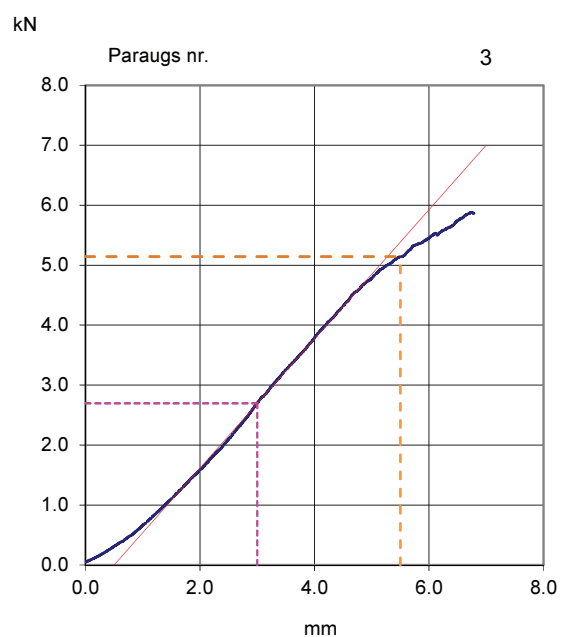
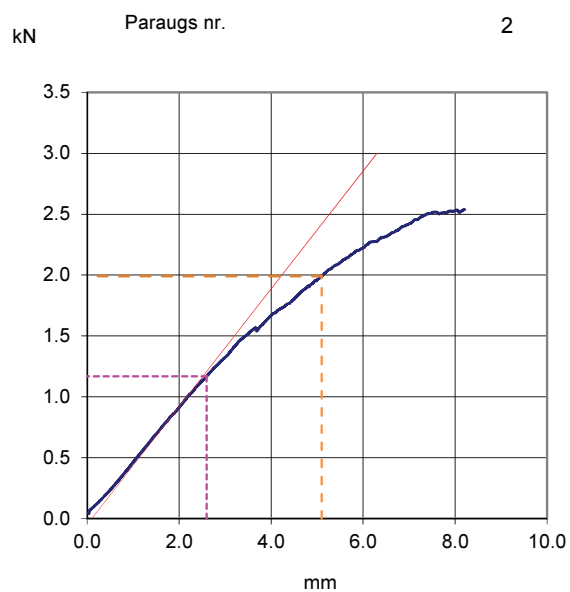
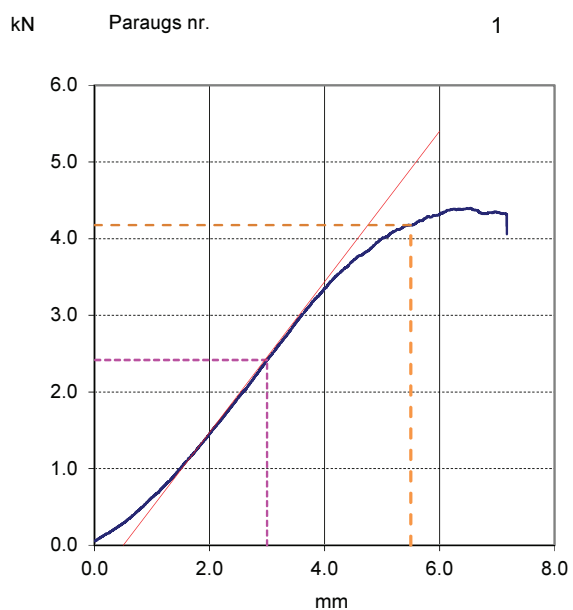
Ceļu specifikācijas, 2017. [tiešsaiste], AS „Latvijas Valsts ceļi”, Rīga, 2017 [Skatīts 2017. g. 11. februārī].

Pieejams: http://lvceļi.lv/wp-content/uploads/2015/06/Ceļu_specifikācijas_2017.pdf

1. PIELIKUMS

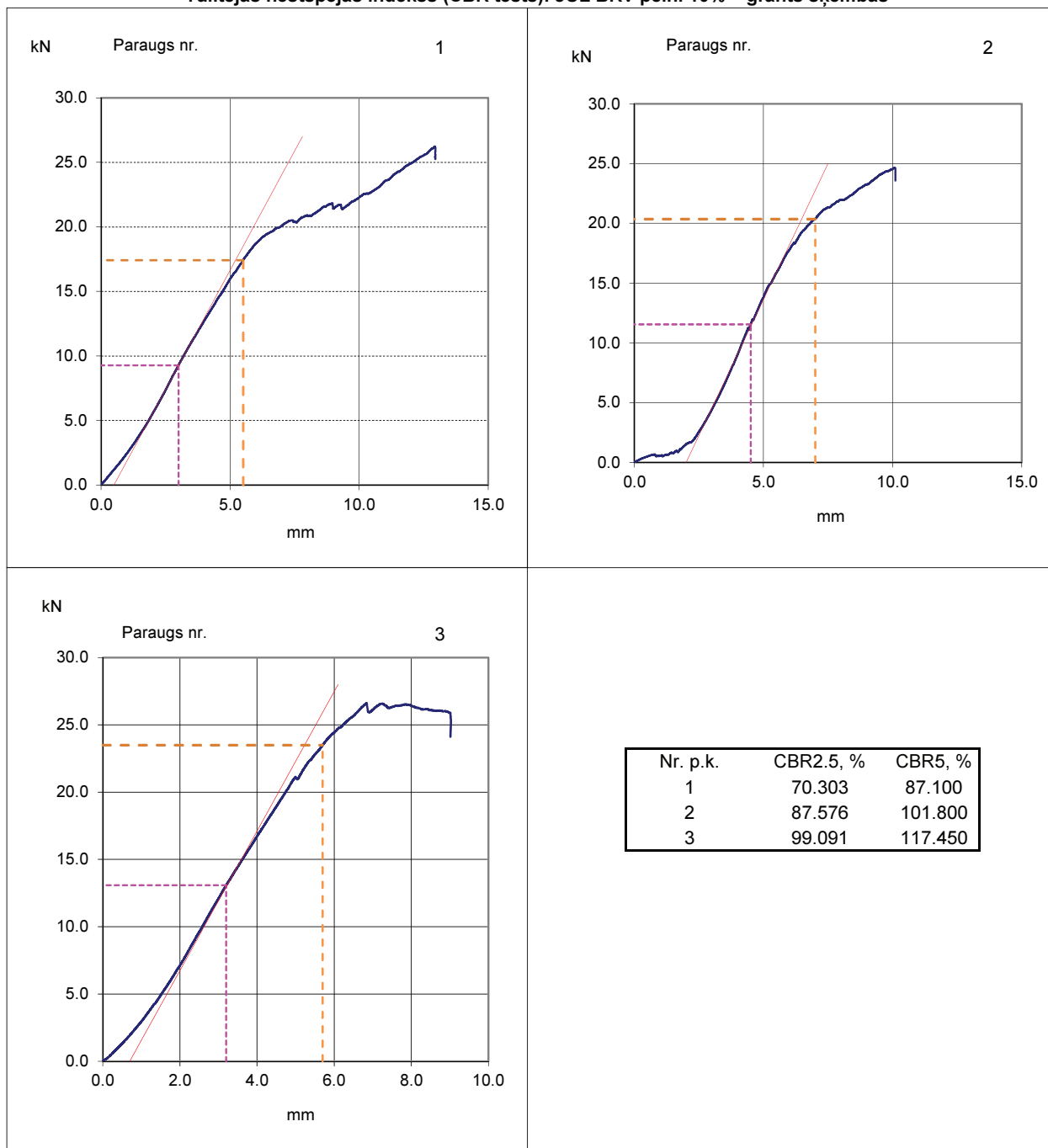
TŪLĪTĒJĀS NESTSPĒJAS RĀDĪTĀJI

Tūlītējās nestspējas indekss (CBR tests): Grants šķembas bez pelniem

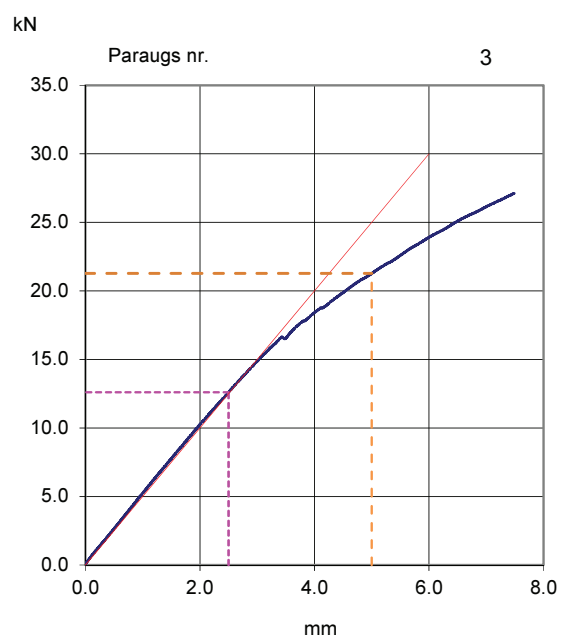
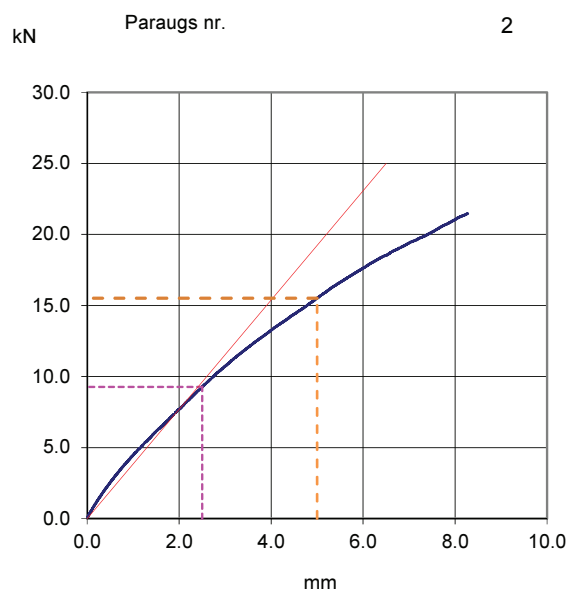
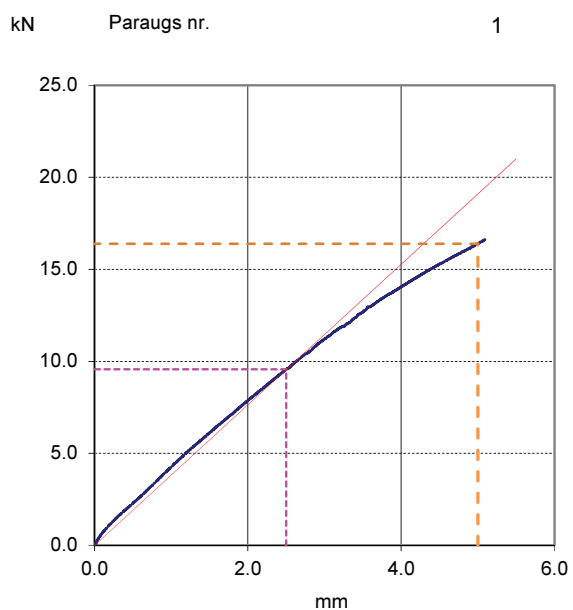


Nr. p.k.	CBR2.5, %	CBR5, %
1	18.311	20.880
2	8.856	9.960
3	20.424	25.710

Tūlītējās nestspējas indekss (CBR tests): JUL BKV pelni 10% + grants šķembas

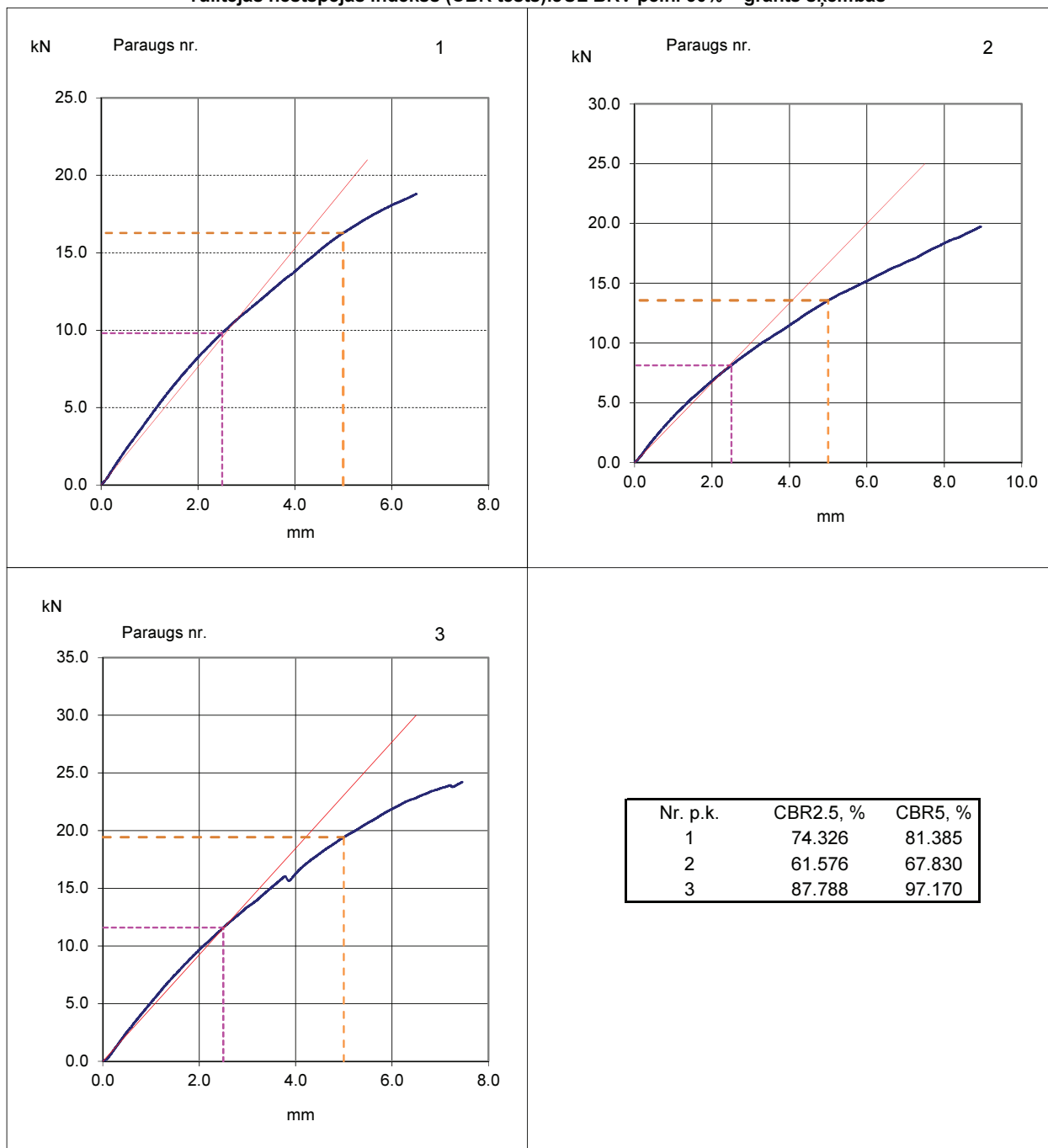


Tūlītējās nestspējas indekss (CBR tests): JUL BKV pelni 20% + grants šķembas

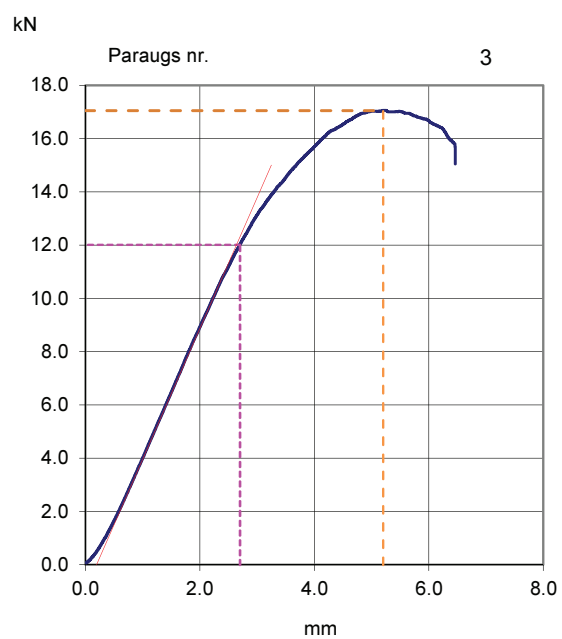
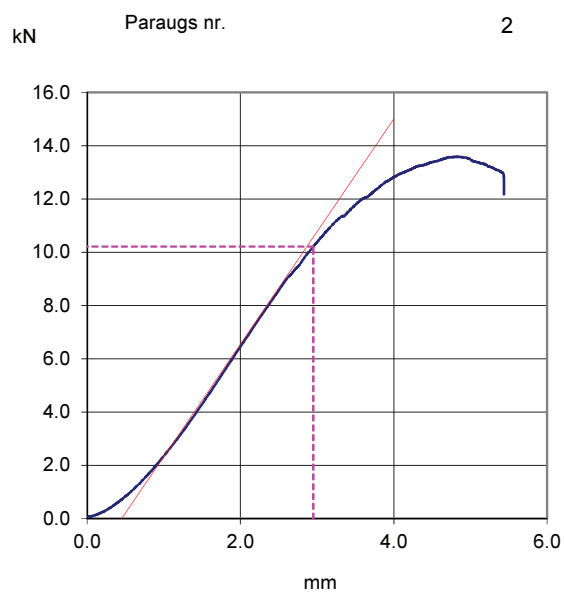
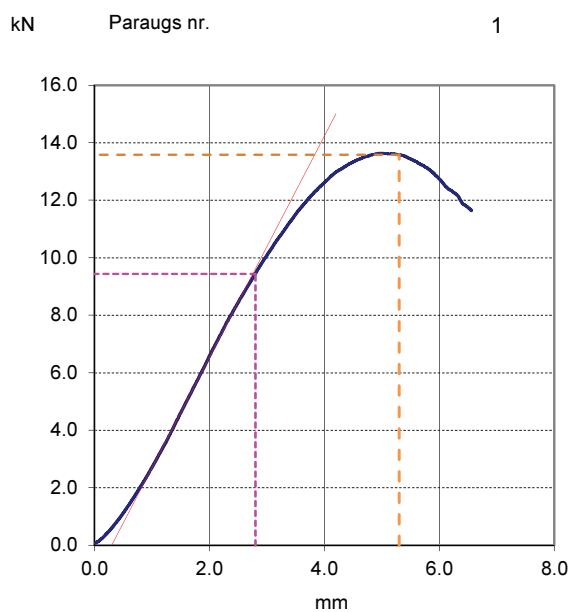


Nr. p.k.	CBR2.5, %	CBR5, %
1	72.447	81.940
2	70.197	77.565
3	95.477	106.370

Tūlītējās nestspējas indekss (CBR tests):JUL BKV pelni 30% + grants šķembas

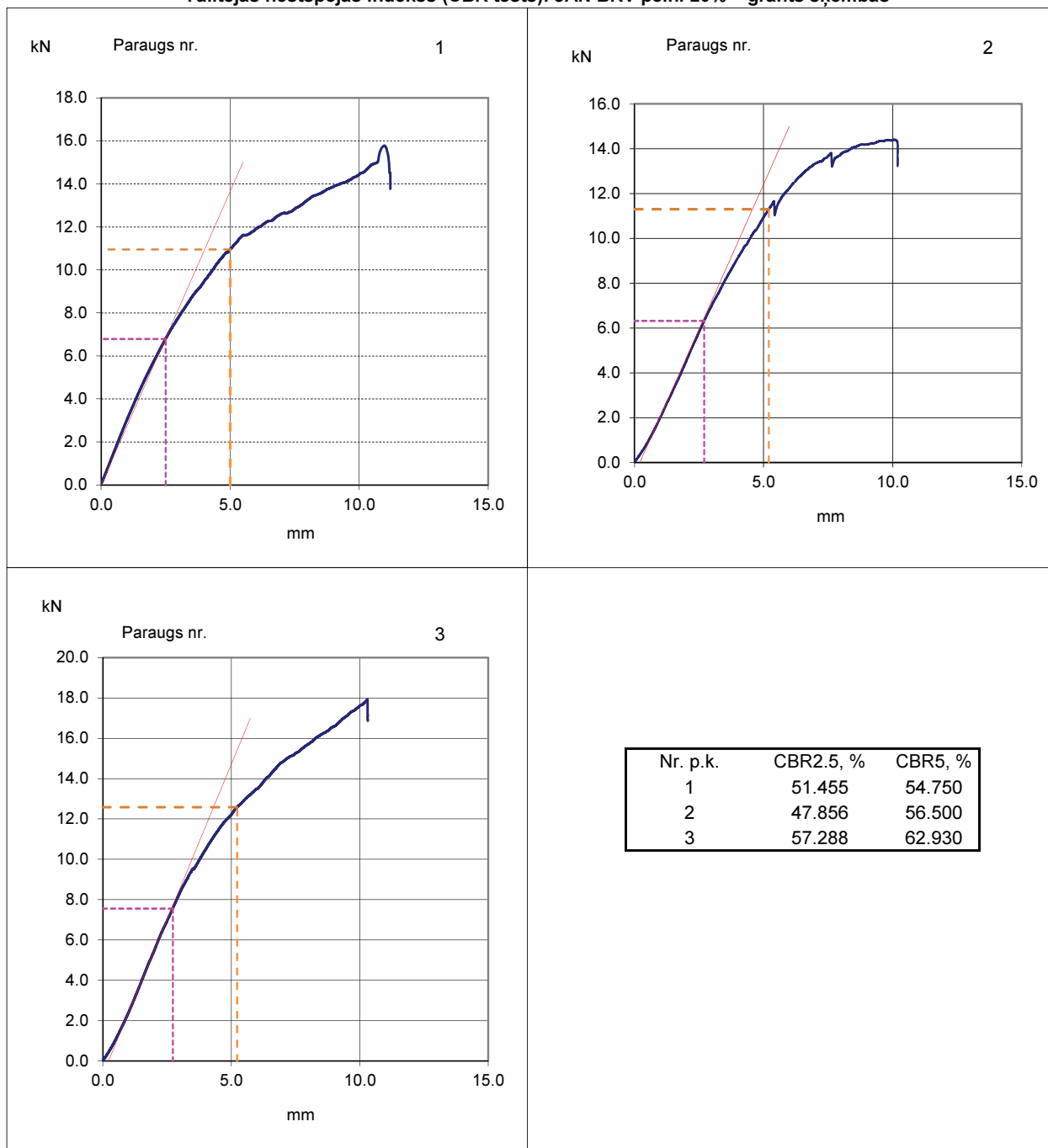


Tūlītējās nestspējas indekss (CBR tests): JAN BKV pelni 10% + grants šķembas

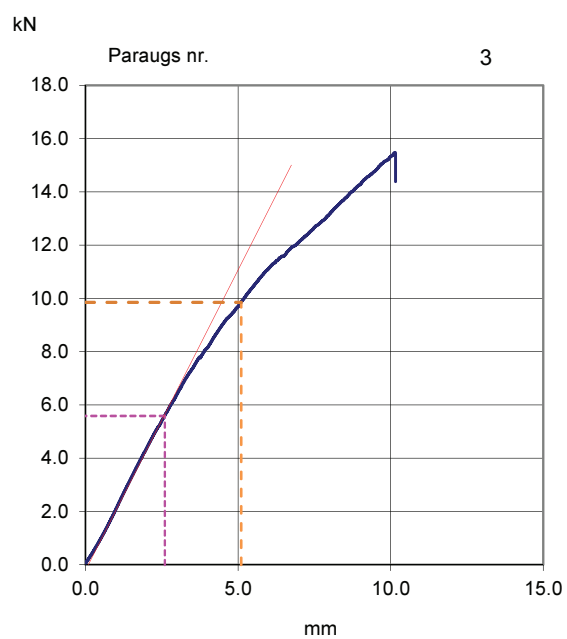
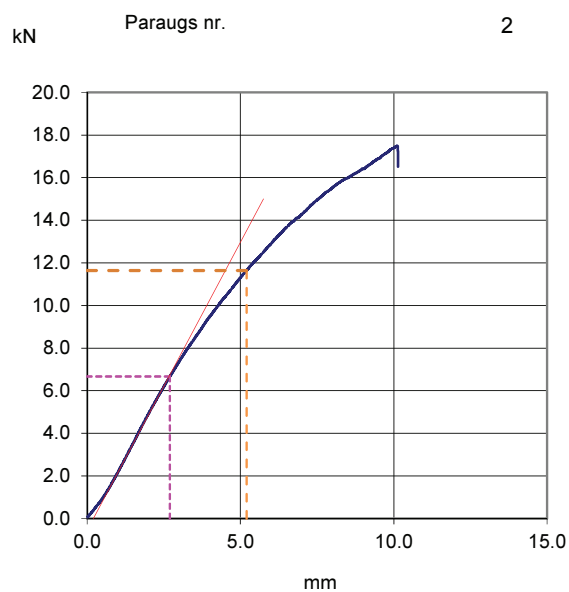
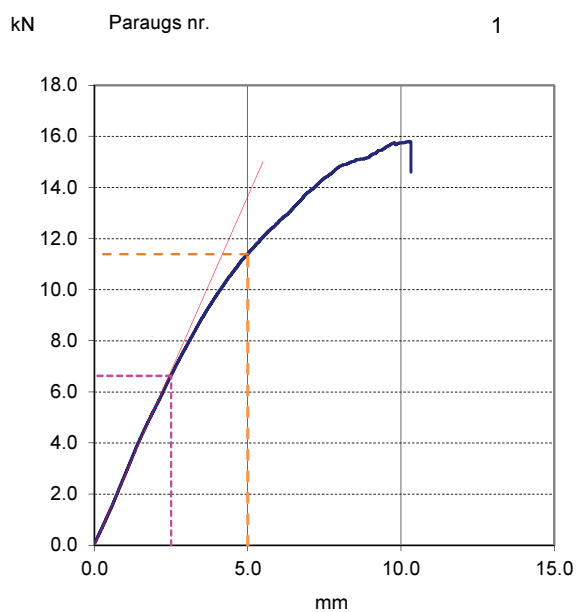


Nr. p.k.	CBR2.5, %	CBR5, %
1	71.508	67.935
2	77.348	
3	91.008	85.260

Tūlītējās nestspējas indekss (CBR tests): JAN BKV pelni 20% + grants šķembas

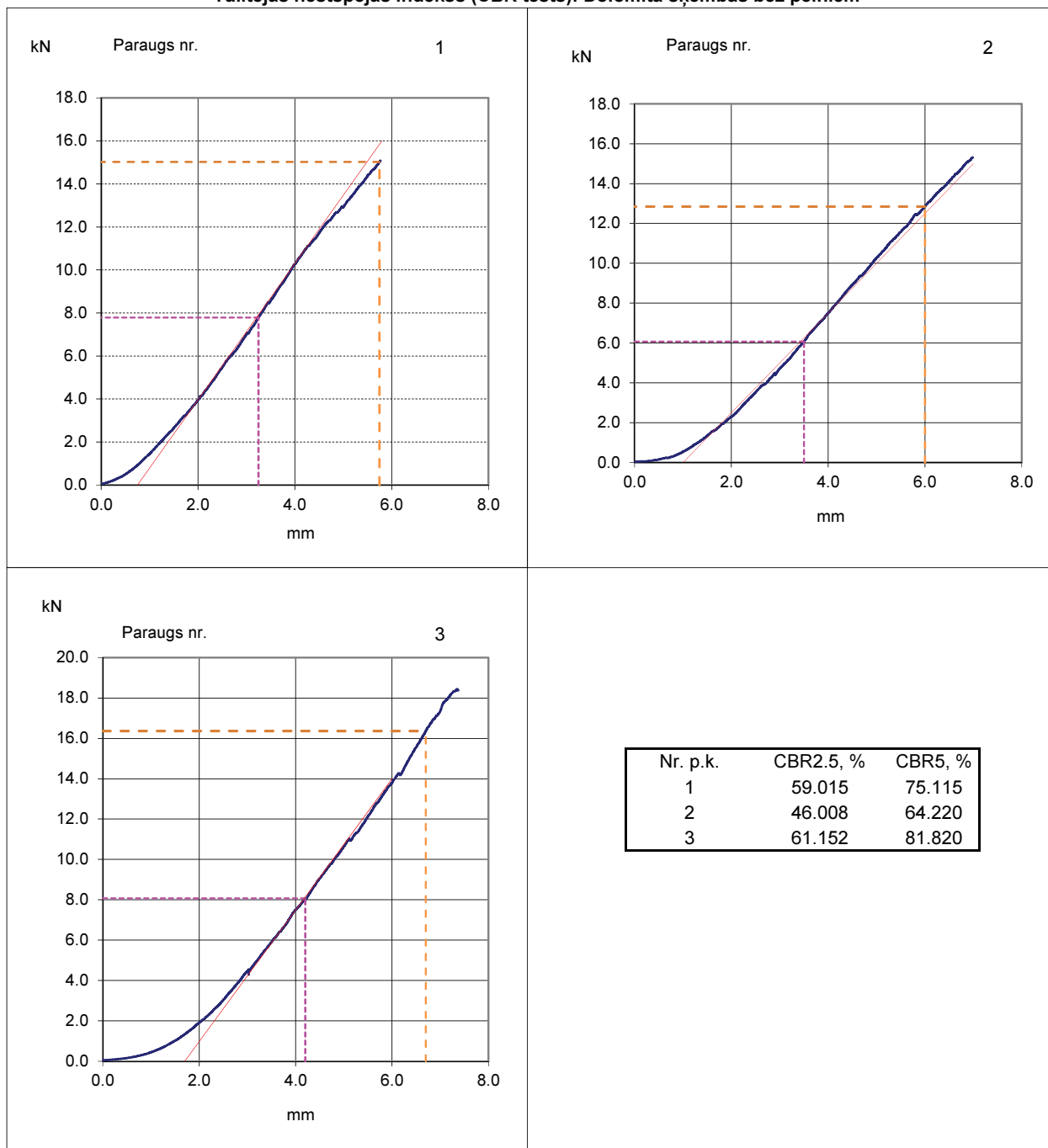


Tūlītējās nestspējas indekss (CBR tests): JAN BKV pelni 30% + grants šķembas

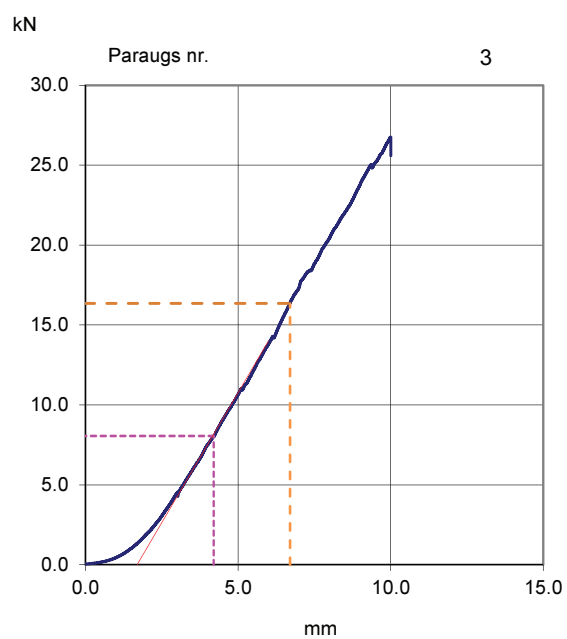
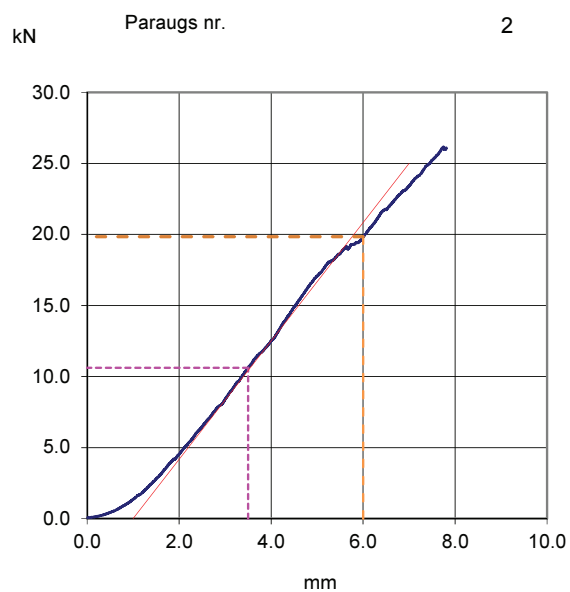
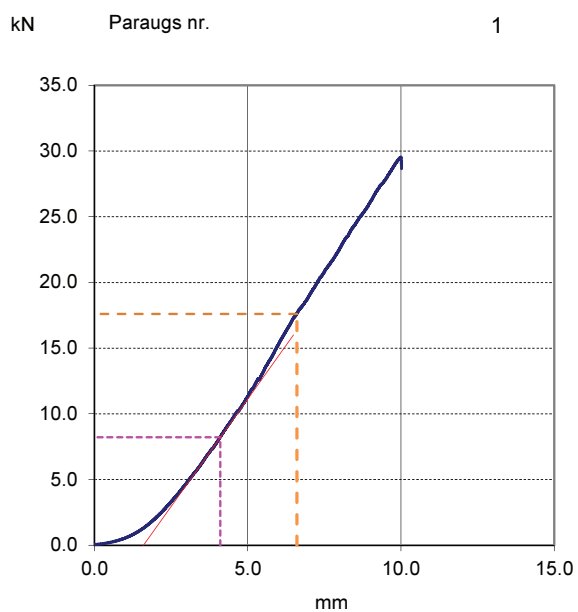


Nr. p.k.	CBR2.5, %	CBR5, %
1	50.235	56.950
2	50.515	58.205
3	42.379	49.270

Tūlītējās nestspējas indekss (CBR tests): Dolomīta šķembas bez pelniem

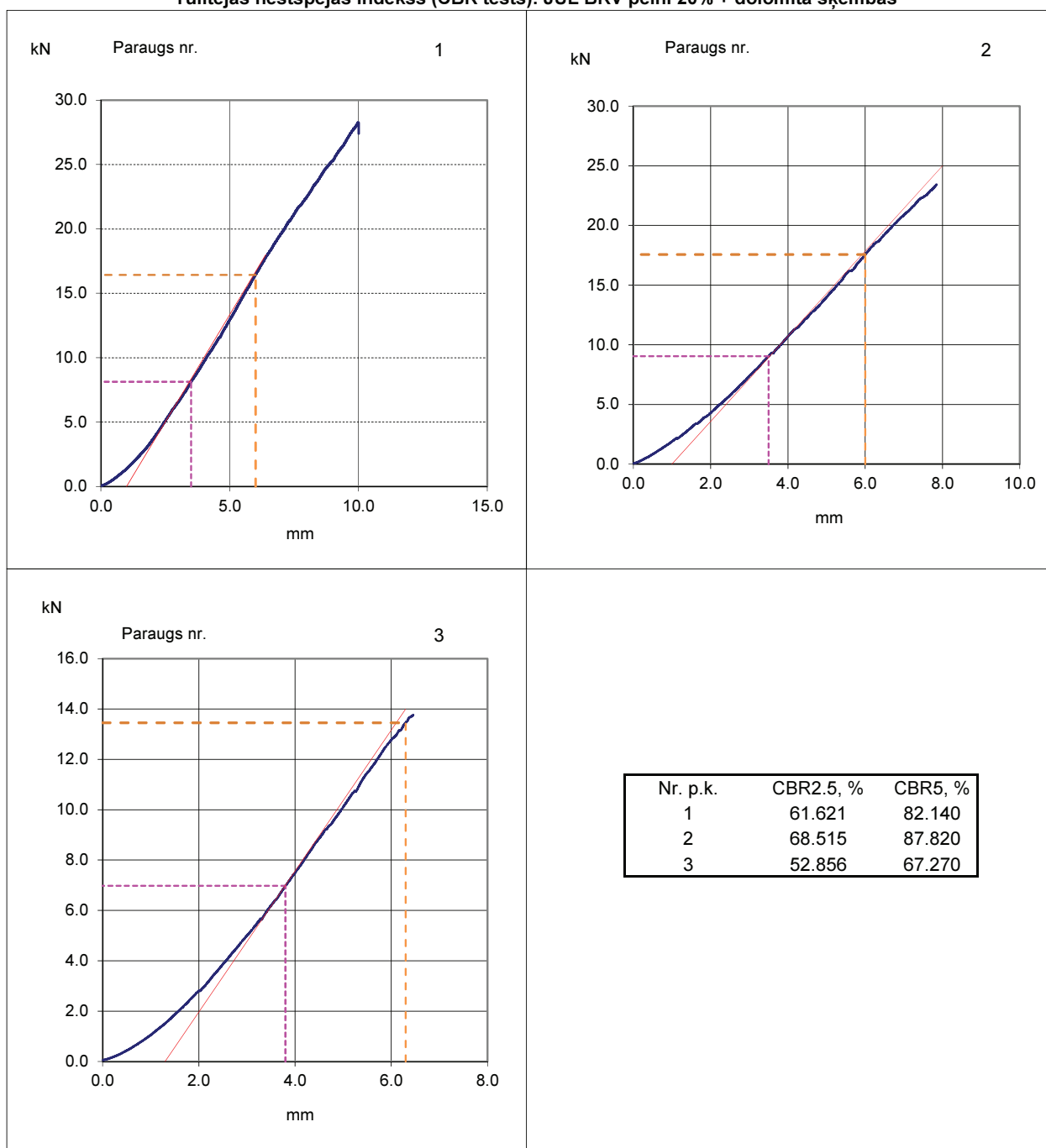


Tūlītējās nestspējas indekss (CBR tests): JUL BKV pelni 10% + dolomīta šķembas

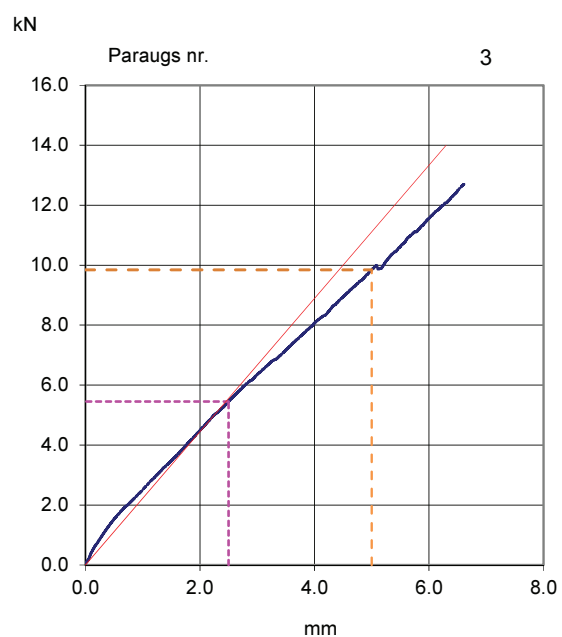
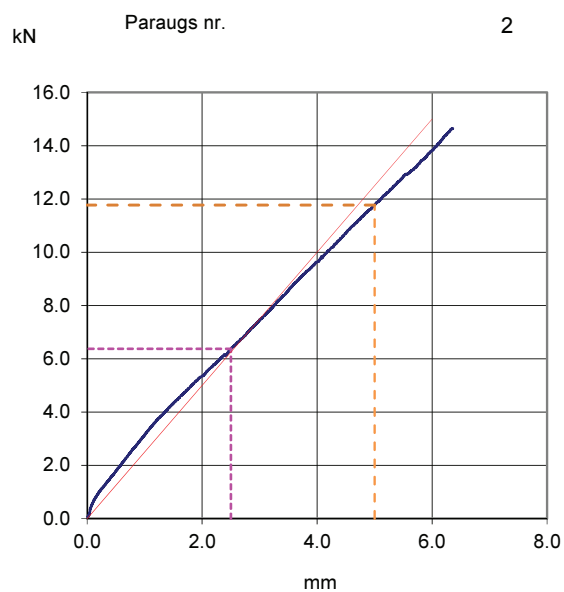
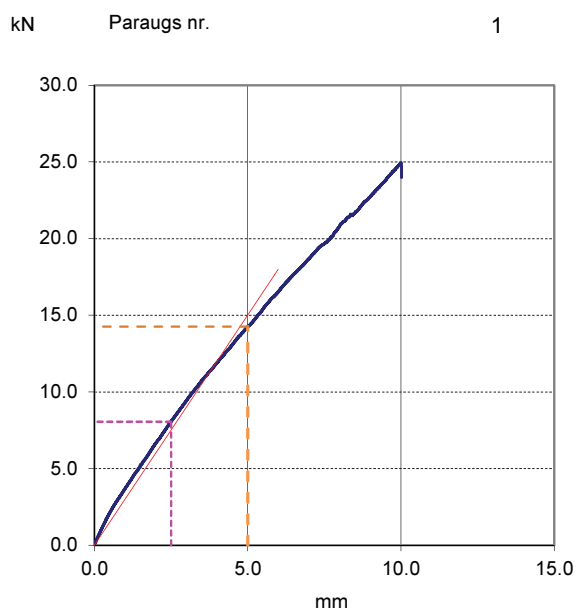


Nr. p.k.	CBR2.5, %	CBR5, %
1	62.288	88.030
2	80.439	99.230
3	61.152	81.820

Tūlītējās nestspējas indekss (CBR tests): JUL BKV pelni 20% + dolomīta šķembas

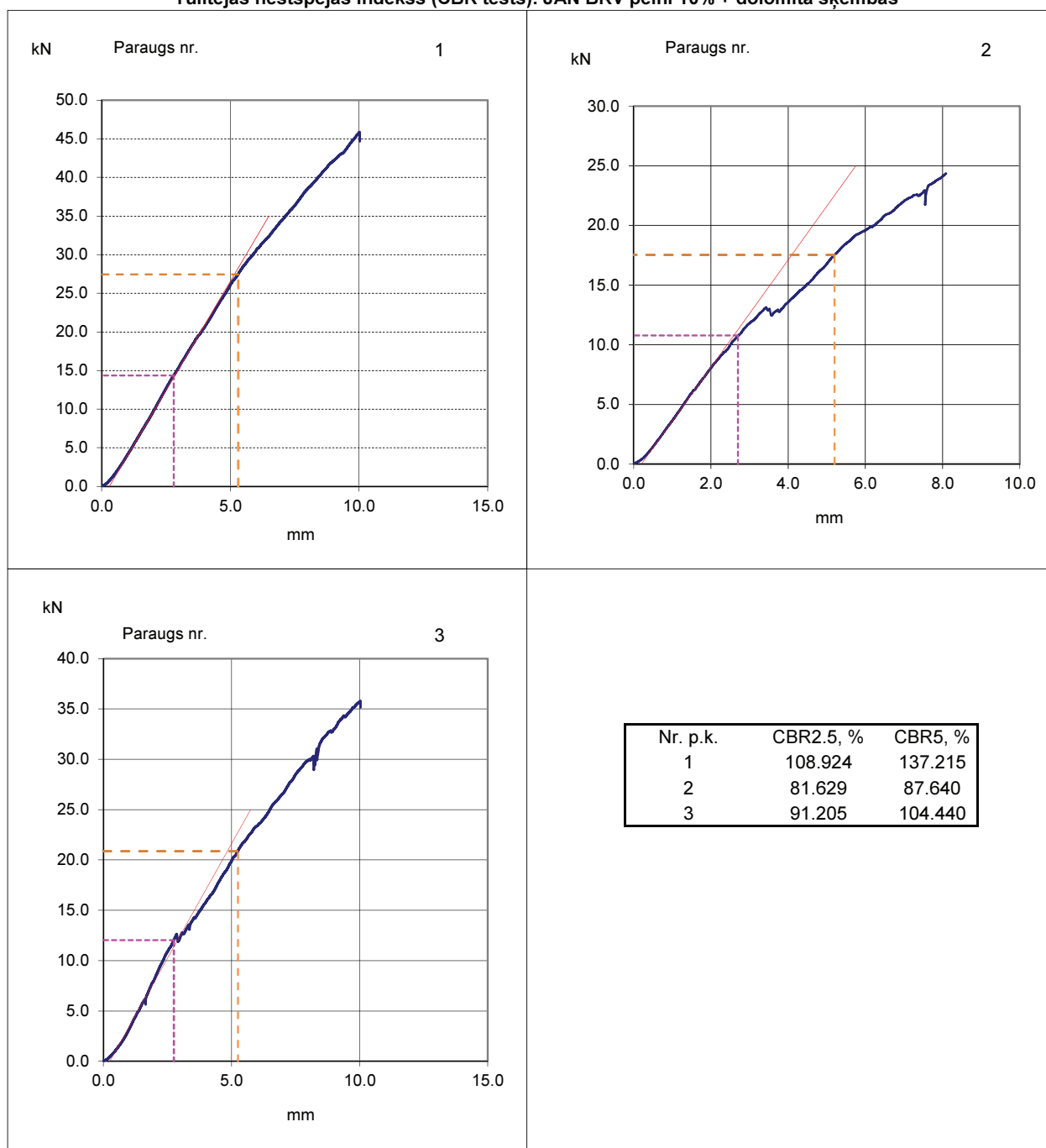


Tūlītējās nestspējas indekss (CBR tests): JUL BKV pelni 30% + dolomīta šķembas

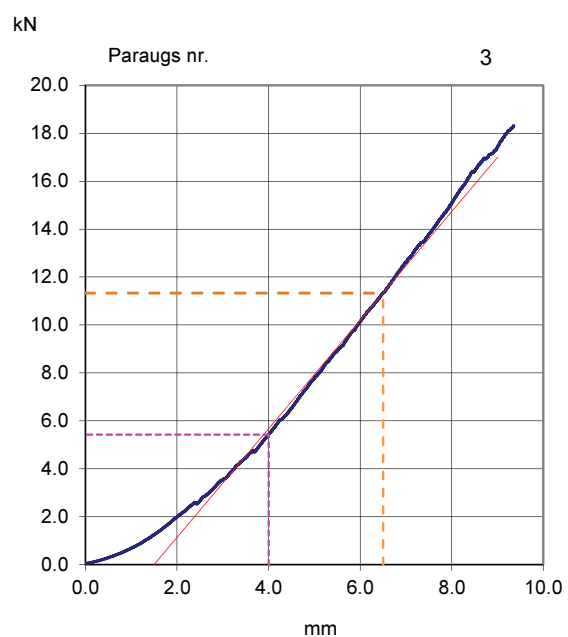
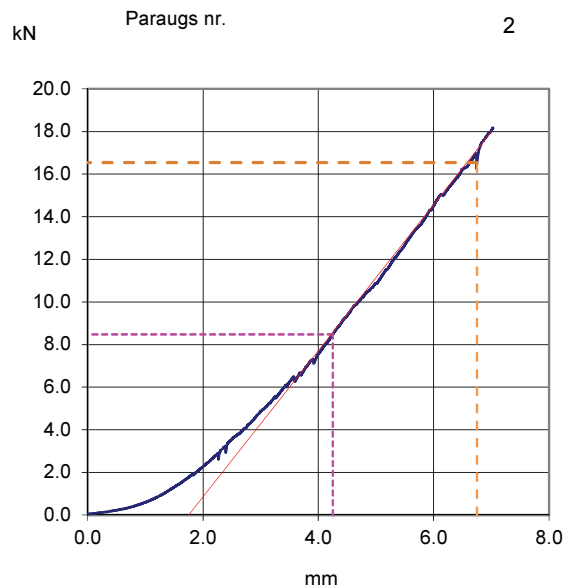
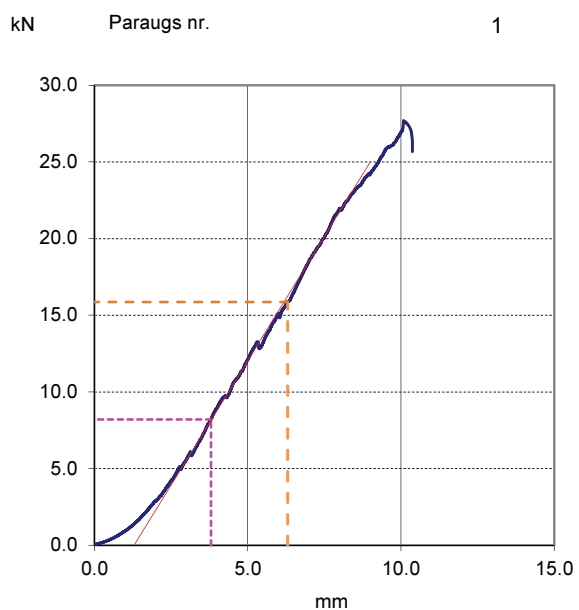


Nr. p.k.	CBR2.5, %	CBR5, %
1	61.030	71.305
2	48.288	58.845
3	41.311	49.215

Tūlītējās nestspējas indekss (CBR tests): JAN BKV pelni 10% + dolomīta šķembas

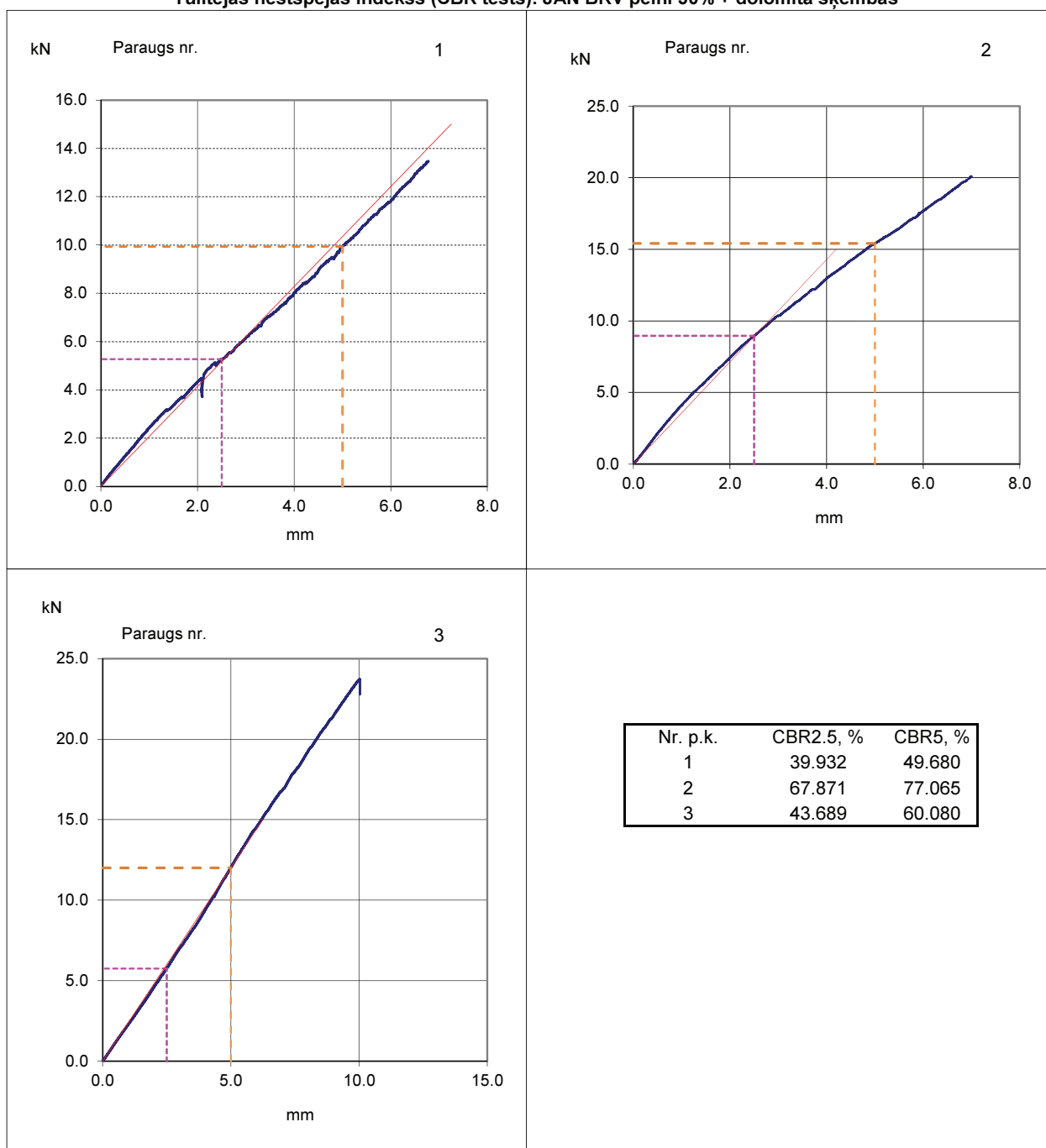


Tūlītējās nestspējas indekss (CBR tests): JAN BKV pelni 20% + dolomīta šķembas



Nr. p.k.	CBR2.5, %	CBR5, %
1	62.182	79.320
2	64.242	82.715
3	41.167	56.675

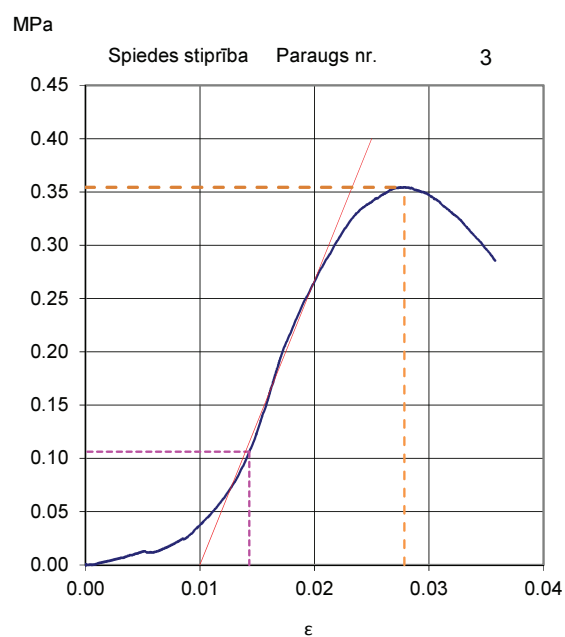
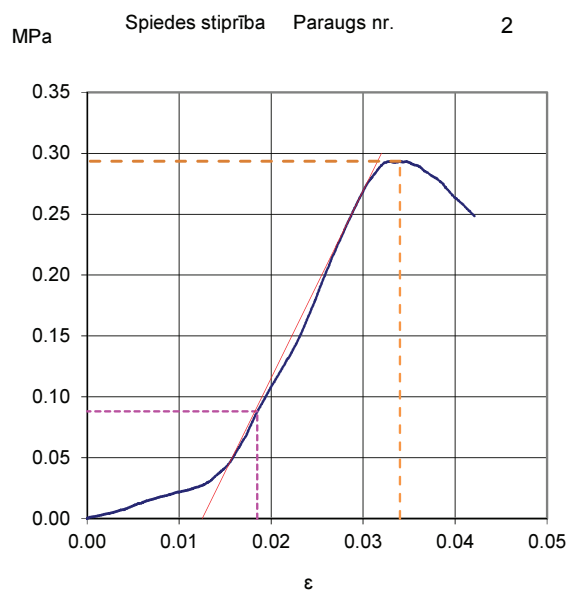
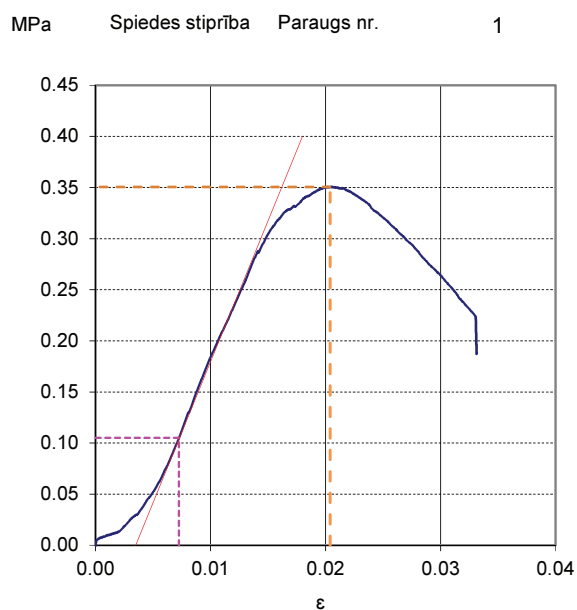
Tūlītējās nestspējas indekss (CBR tests): JAN BKV pelni 30% + dolomīta šķembas



2. PIELIKUMS

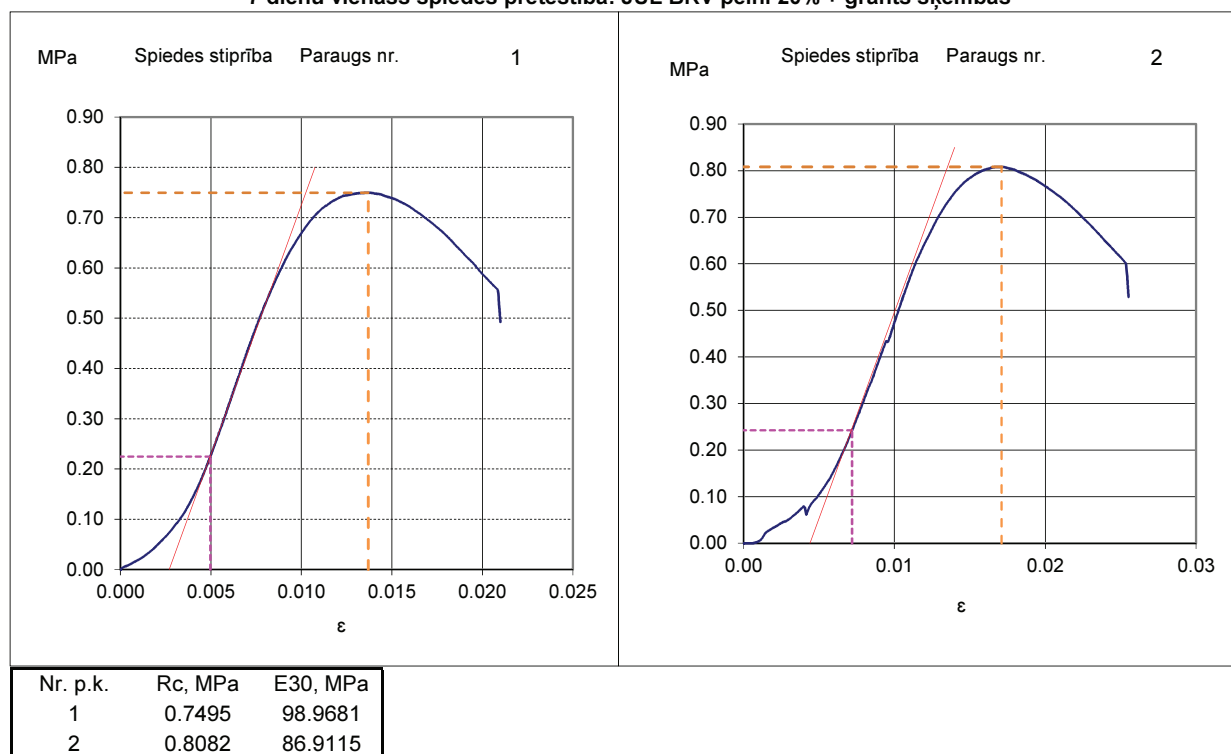
VIENASS SPIEDES TESTI

7 dienu vienass spiedes pretestība: JUL BKV pelni 10% + grants šķembas

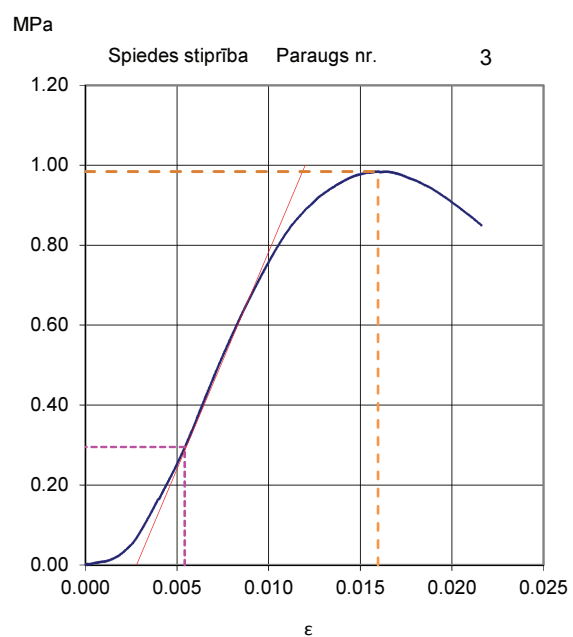
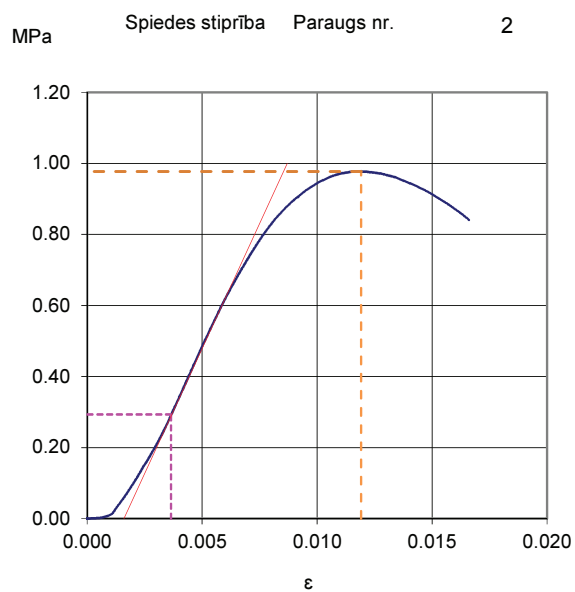
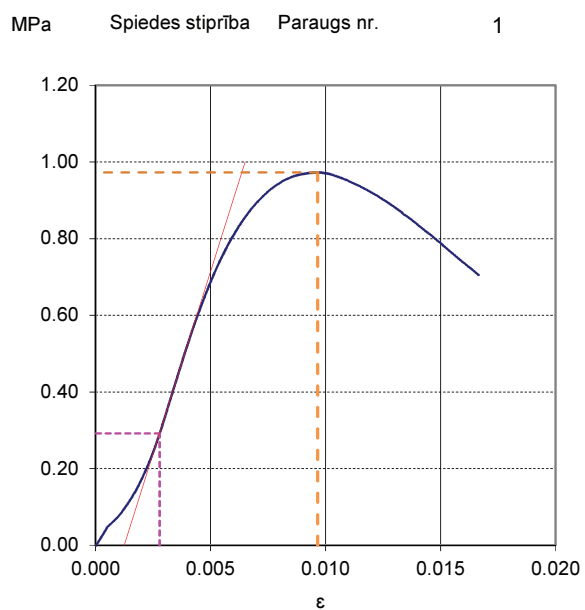


Nr. p.k.	R _c , MPa	E ₃₀ , MPa
1	0.3505	27.98
2	0.2934	14.72
3	0.3543	24.68

7 dienu vienass spiedes pretestība: JUL BKV pelni 20% + grants šķembas

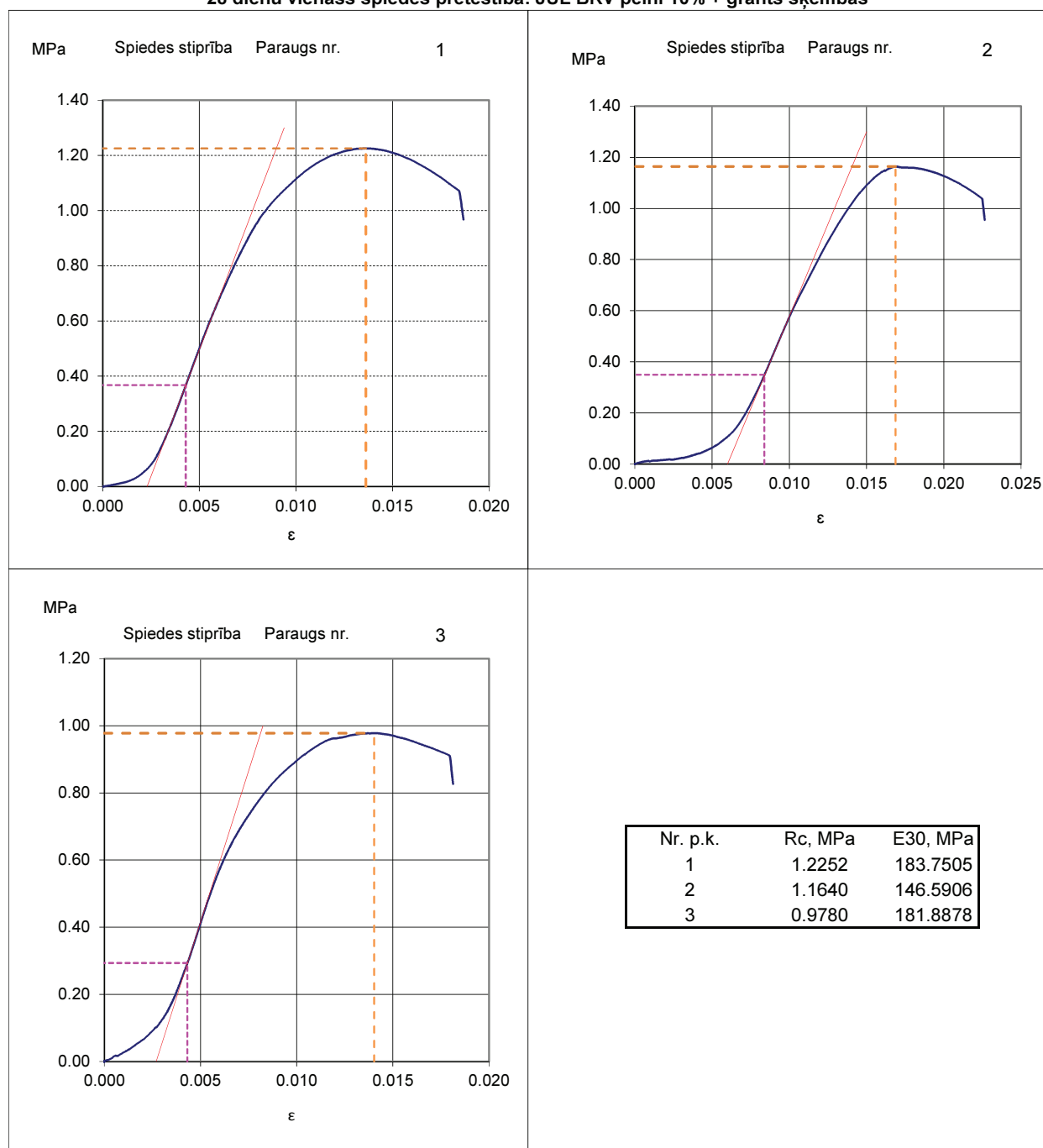


7 dienu vienass spiedes pretestība: JUL BKV pelni 30% + grants šķembas

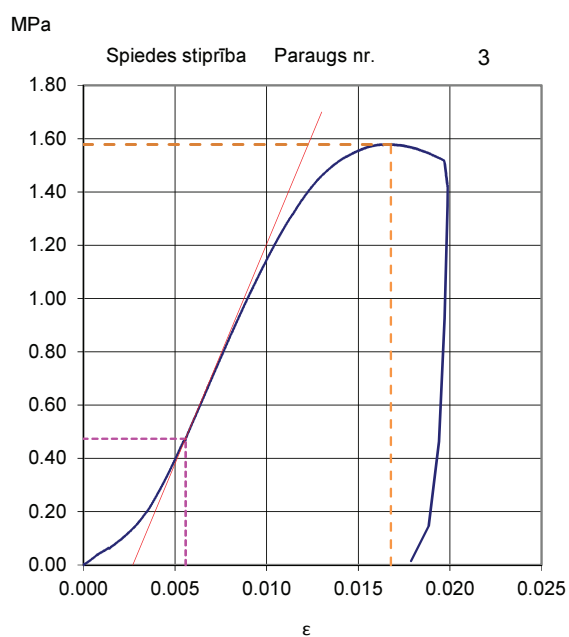
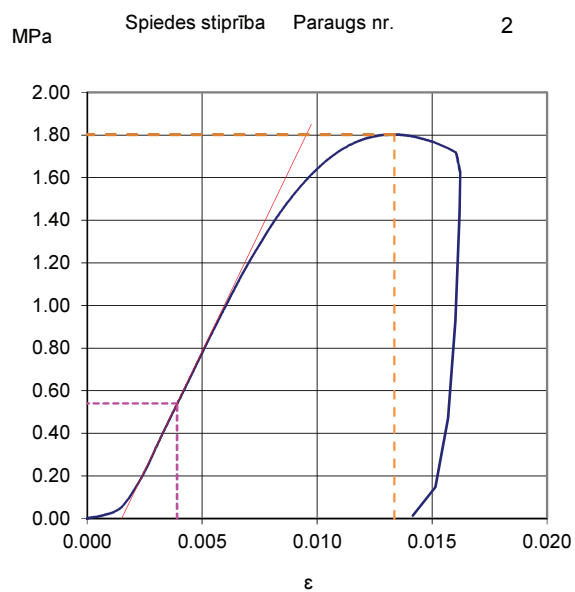
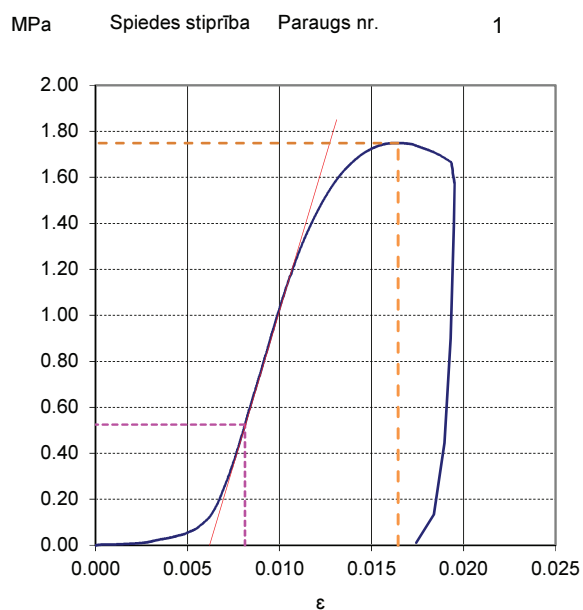


Nr. p.k.	R _c , MPa	E ₃₀ , MPa
1	0.9726	189.3221
2	0.9773	143.3134
3	0.9843	112.7982

28 dienu vienass spiedes pretestība: JUL BKV pelni 10% + grants šķembas

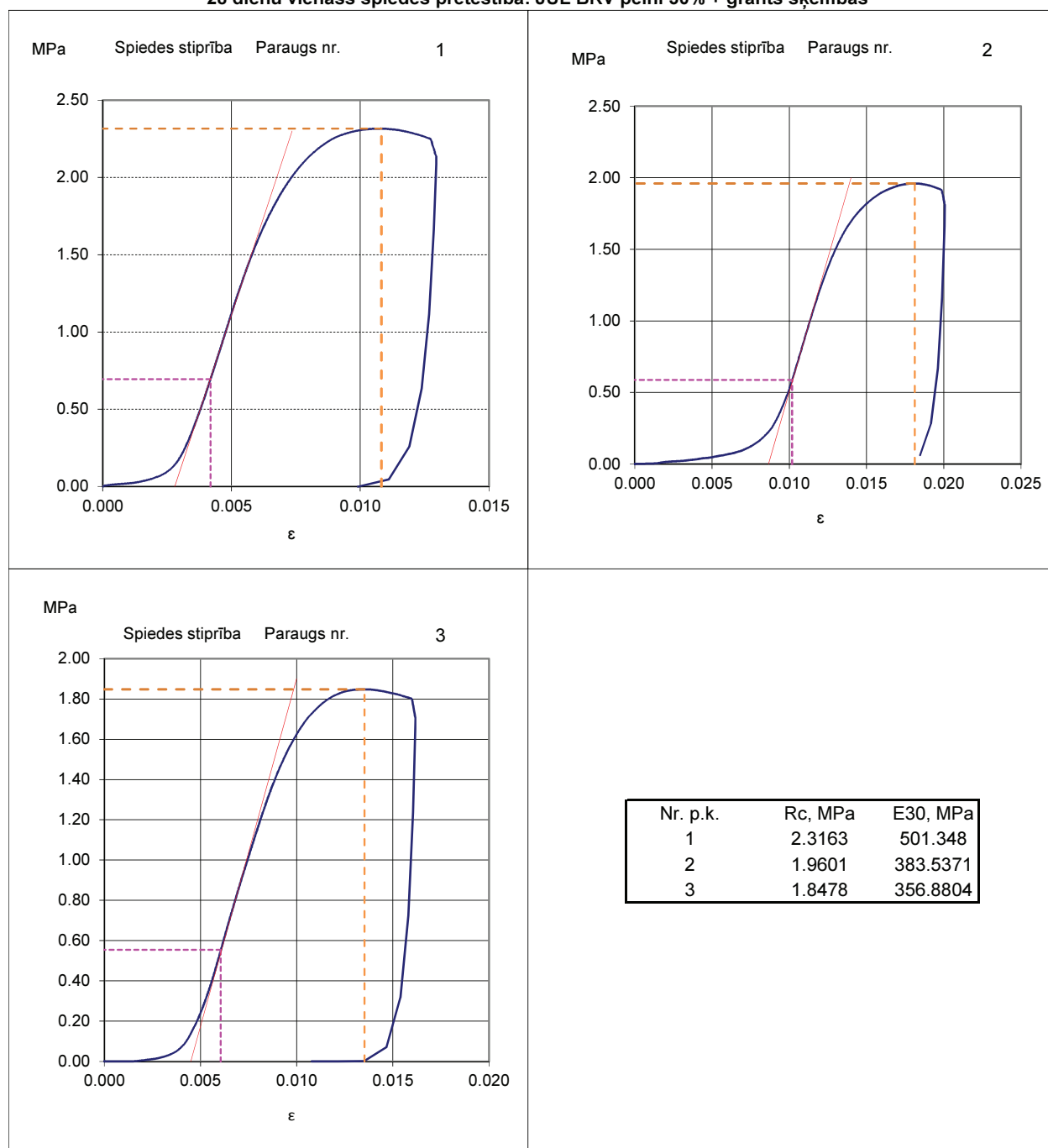


28 dienu vienass spiedes pretestība: JUL BKV pelni 20% + grants šķembas

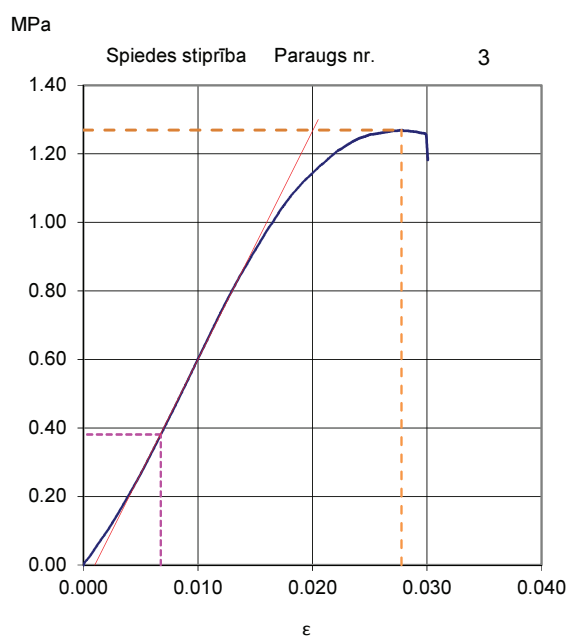
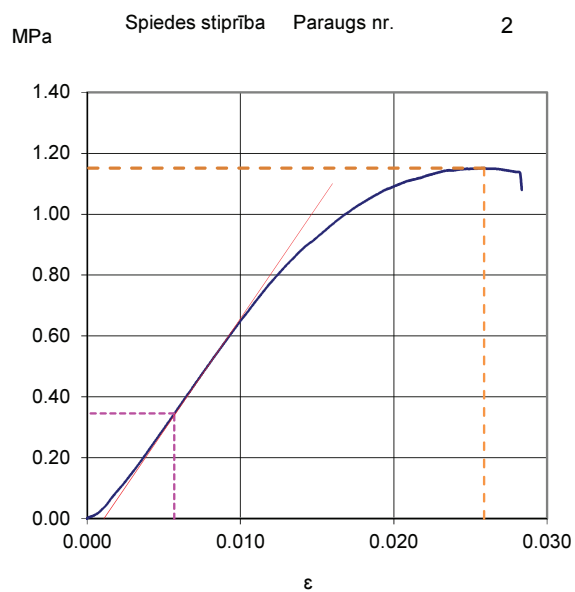
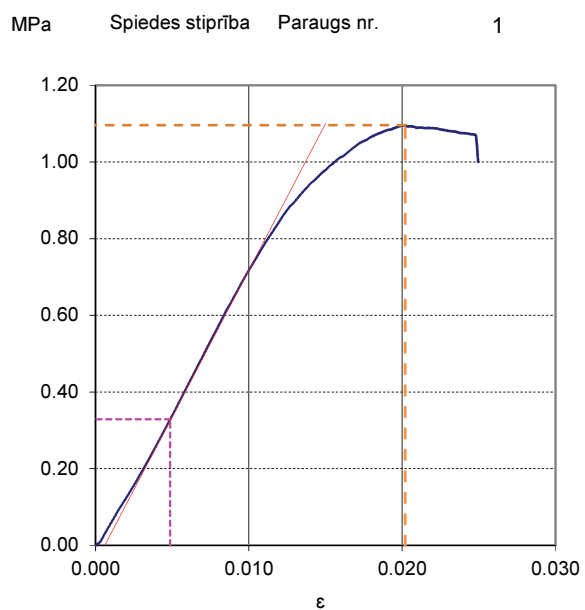


Nr. p.k.	R _c , MPa	E ₃₀ , MPa
1	1.7487	273.041
2	1.8022	224.2322
3	1.5778	164.4693

28 dienu vienass spiedes pretestība: JUL BKV pelni 30% + grants šķembas

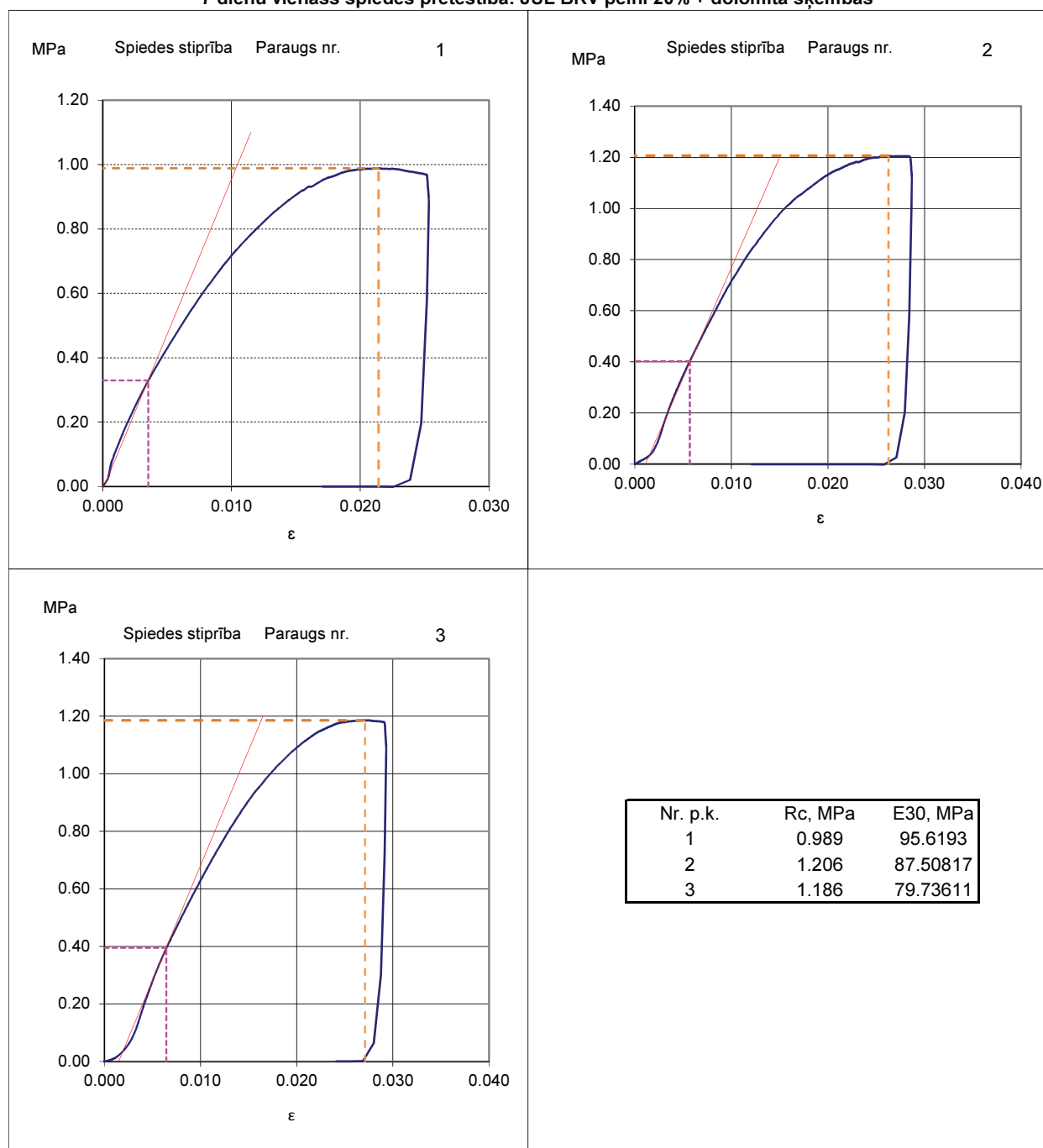


7 dienu vienass spiedes pretestība: JUL BKV pelni 10% + dolomīta šķembas

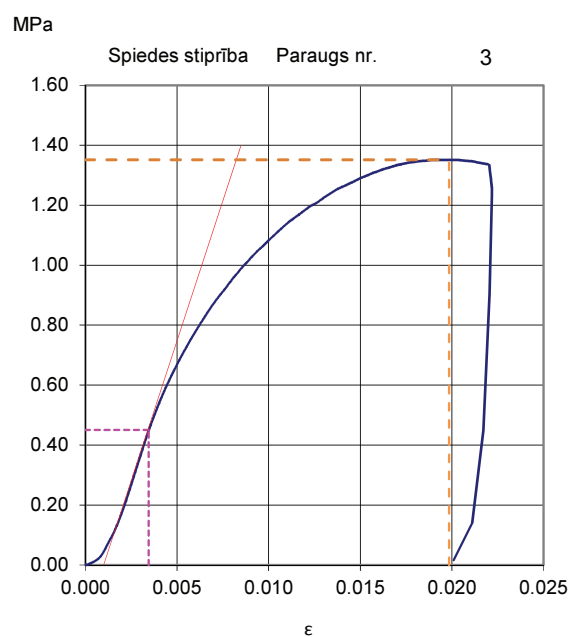
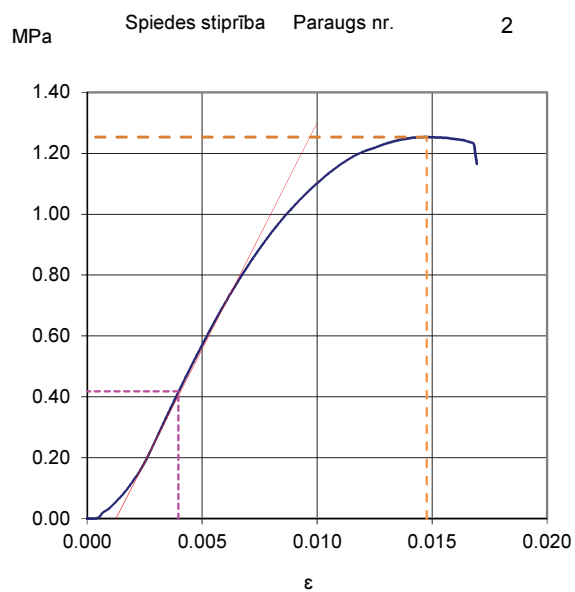
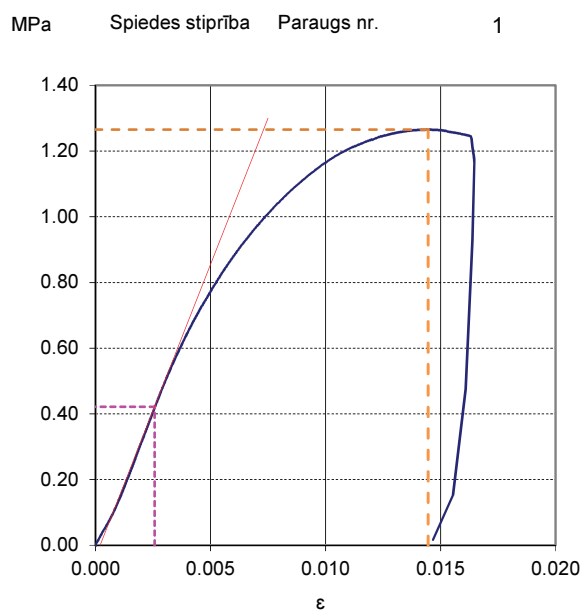


Nr. p.k.	Rc, MPa	E30, MPa
1	1.096	77.00571
2	1.151	75.47037
3	1.269	66.22458

7 dienu vienass spiedes pretestība: JUL BKV pelni 20% + dolomīta šķembas

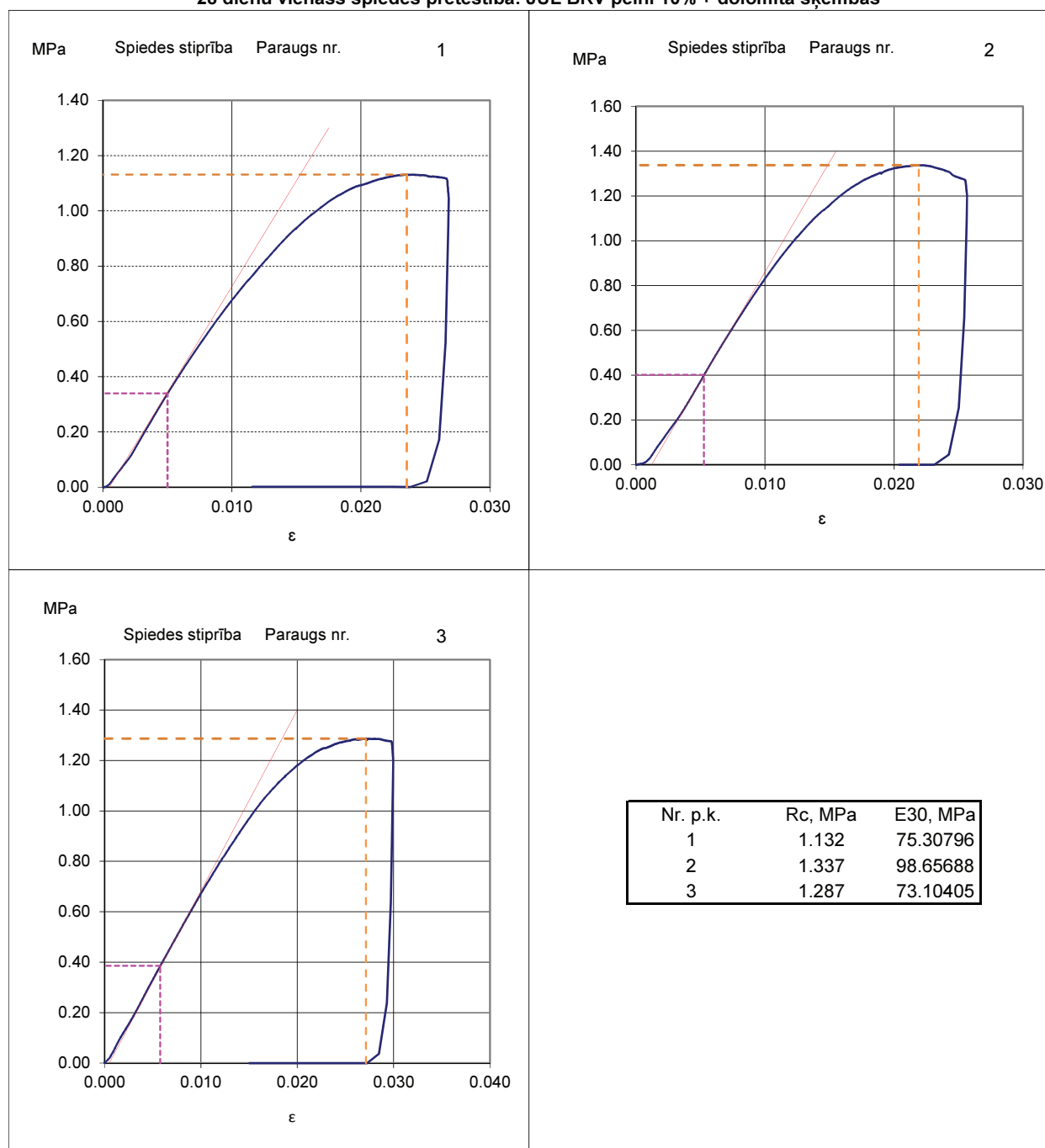


7 dienu vienass spiedes pretestība: JUL BKV pelni 30% + dolomīta šķembas

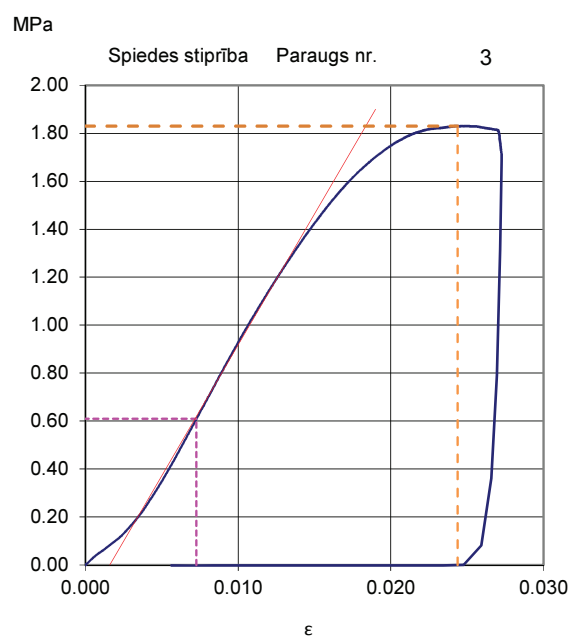
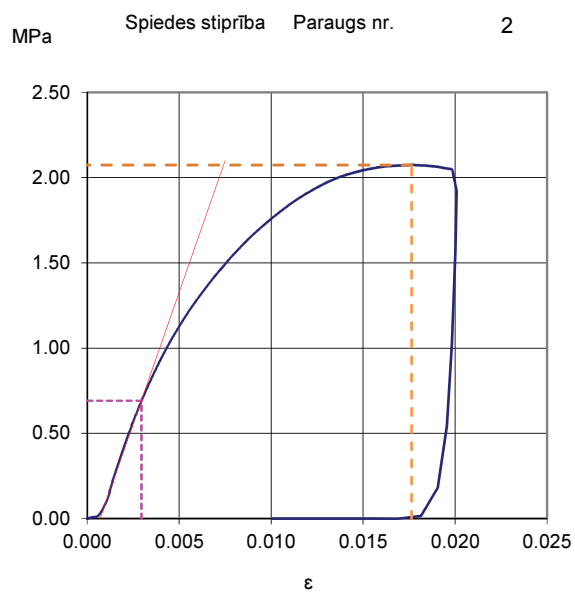
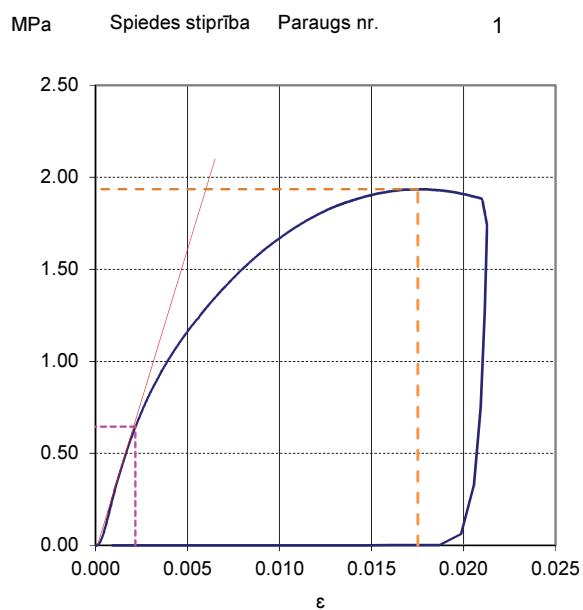


Nr. p.k.	Rc, MPa	E30, MPa
1	1.265	177.6754
2	1.253	153.9651
3	1.351	183.7262

28 dienu vienass spiedes pretestība: JUL BKV pelni 10% + dolomīta šķembas

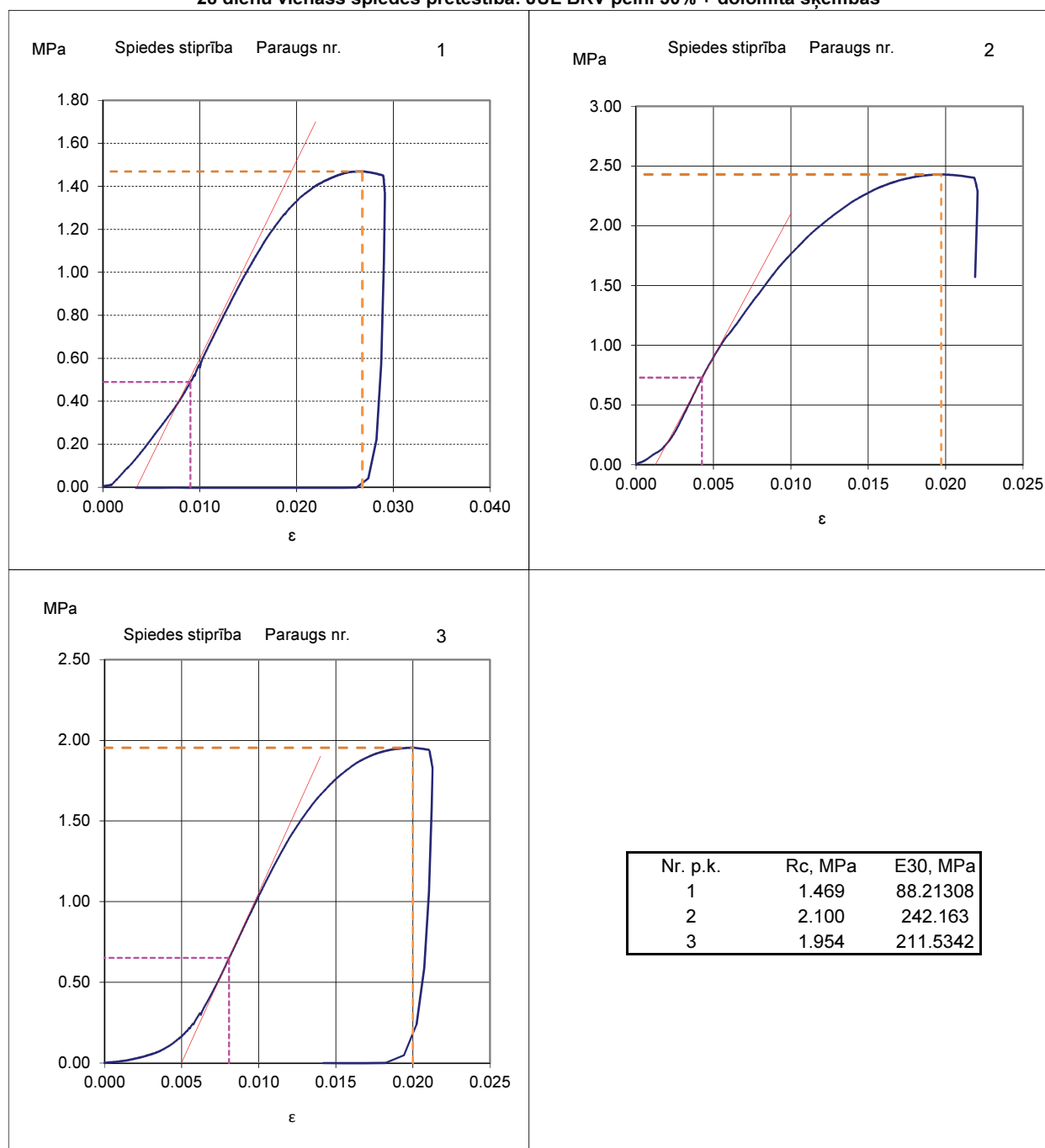


28 dienu vienass spiedes pretestība: JUL BKV pelni 20% + dolomīta šķembas

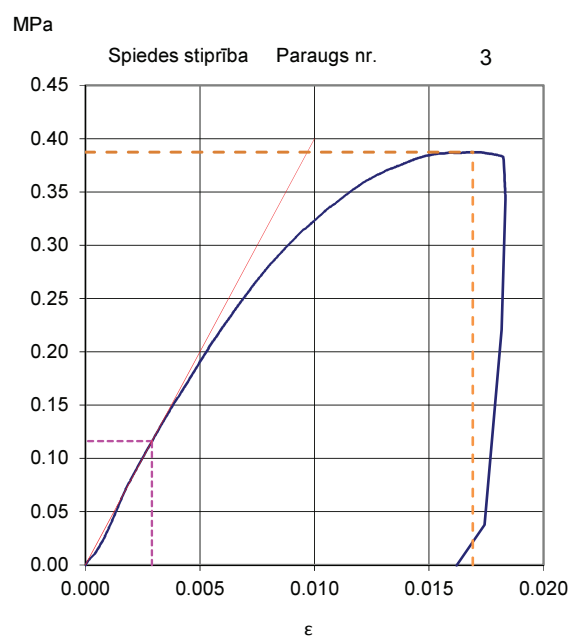
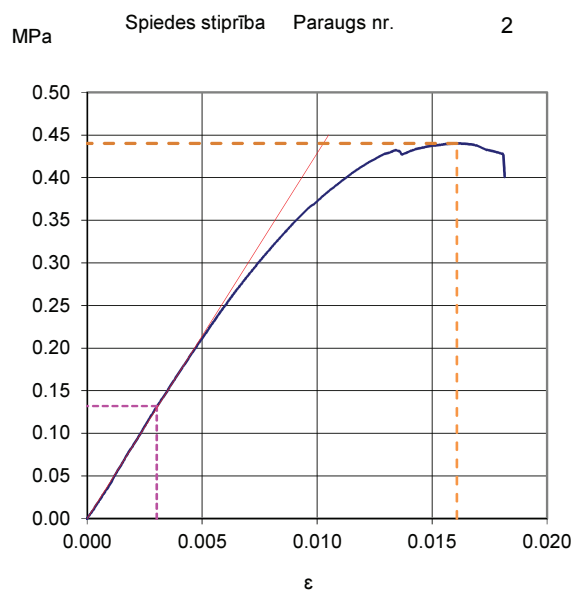
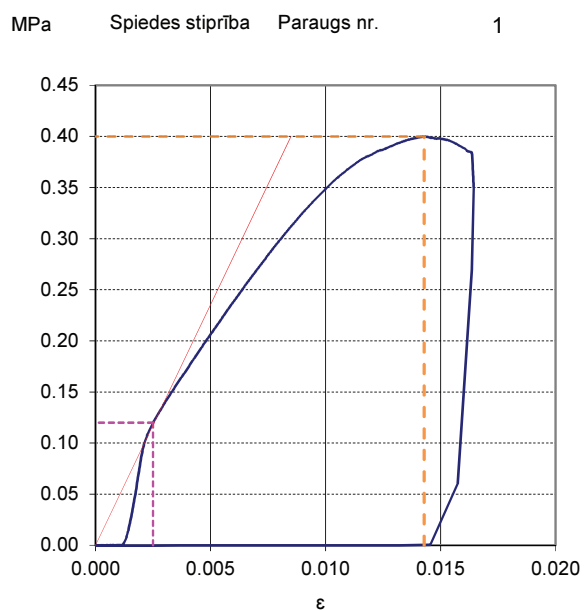


Nr. p.k.	R _c , MPa	E ₃₀ , MPa
1	1.935	312.2076
2	2.074	307.2845
3	1.830	107.6033

28 dienu vienass spiedes pretestība: JUL BKV pelni 30% + dolomīta šķembas

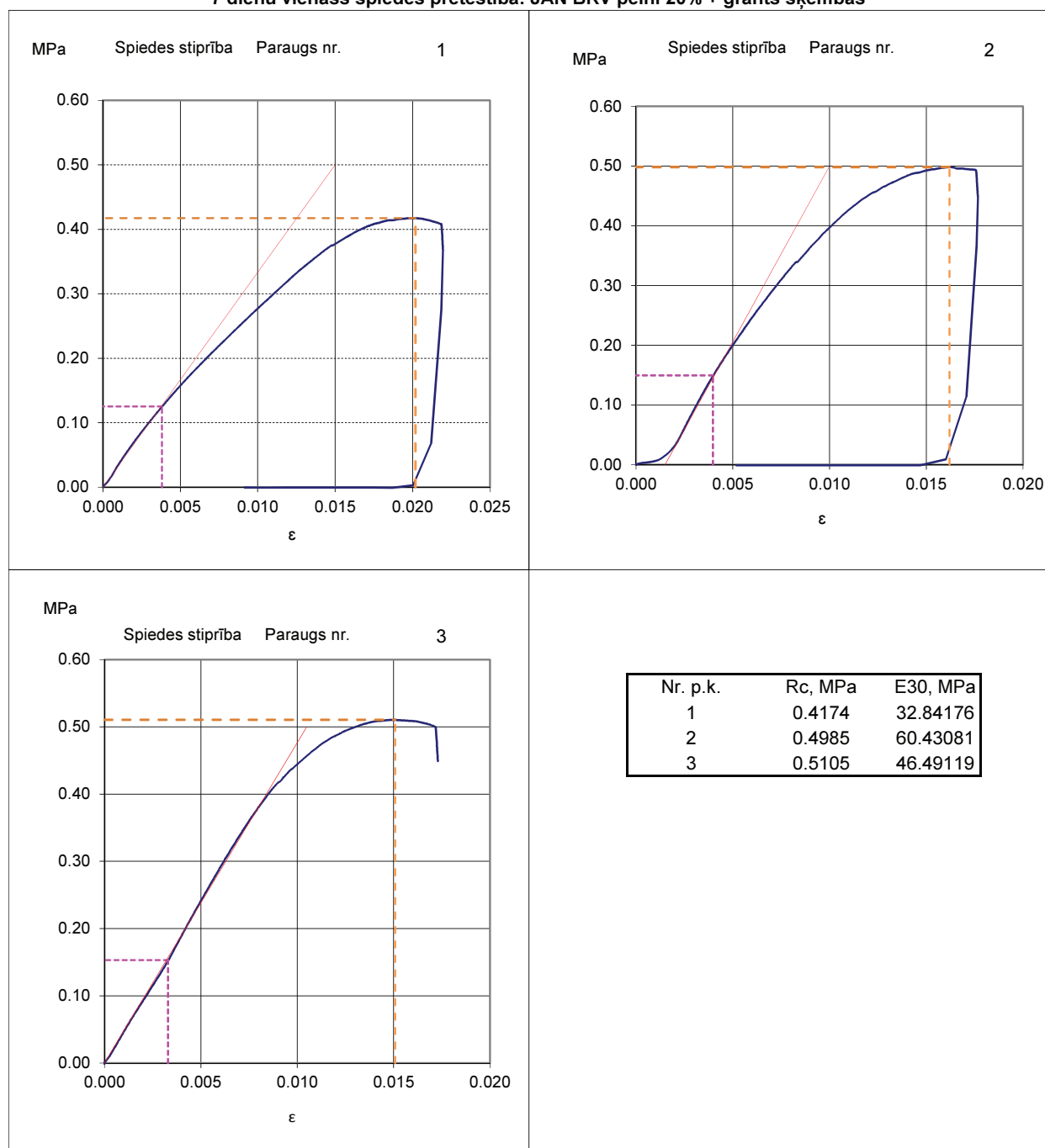


7 dienu vienass spiedes pretestība: JAN BKV pelni 10% + grants šķembas

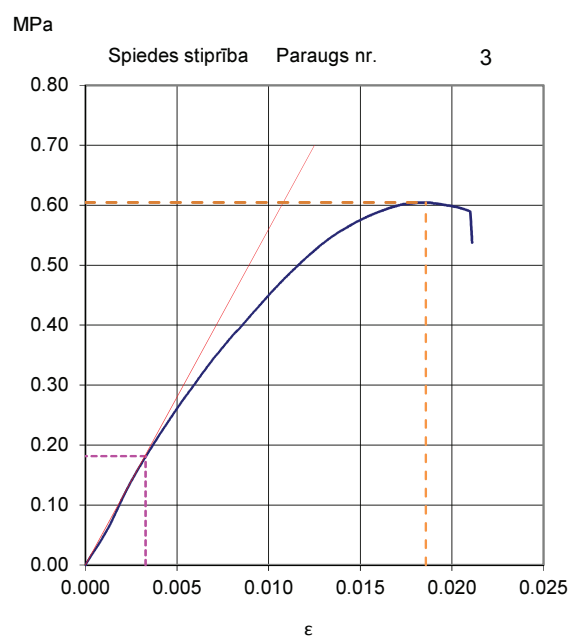
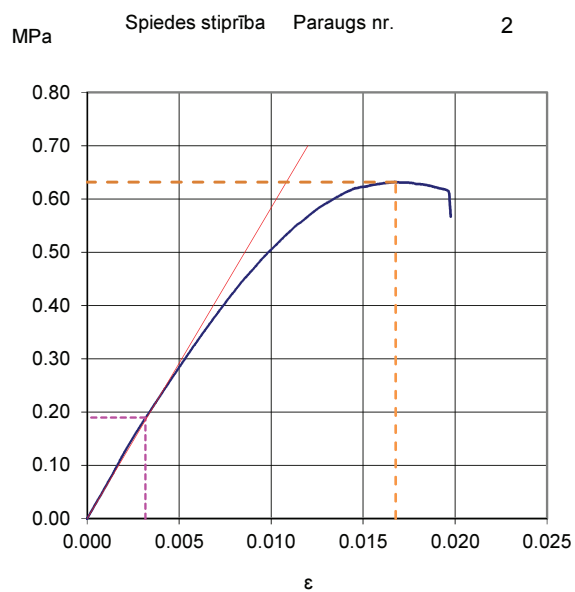
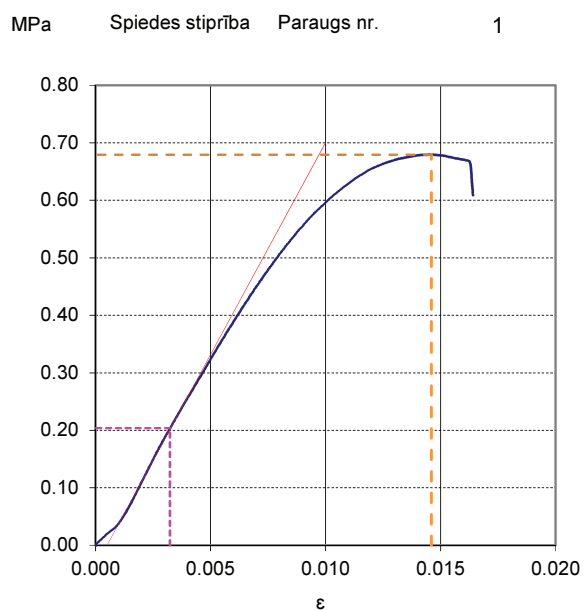


Nr. p.k.	Rc, MPa	E30, MPa
1	0.3999	47.96099
2	0.4402	43.6175
3	0.3874	40.00387

7 dienu vienass spiedes pretestība: JAN BKV pelni 20% + grants šķembas

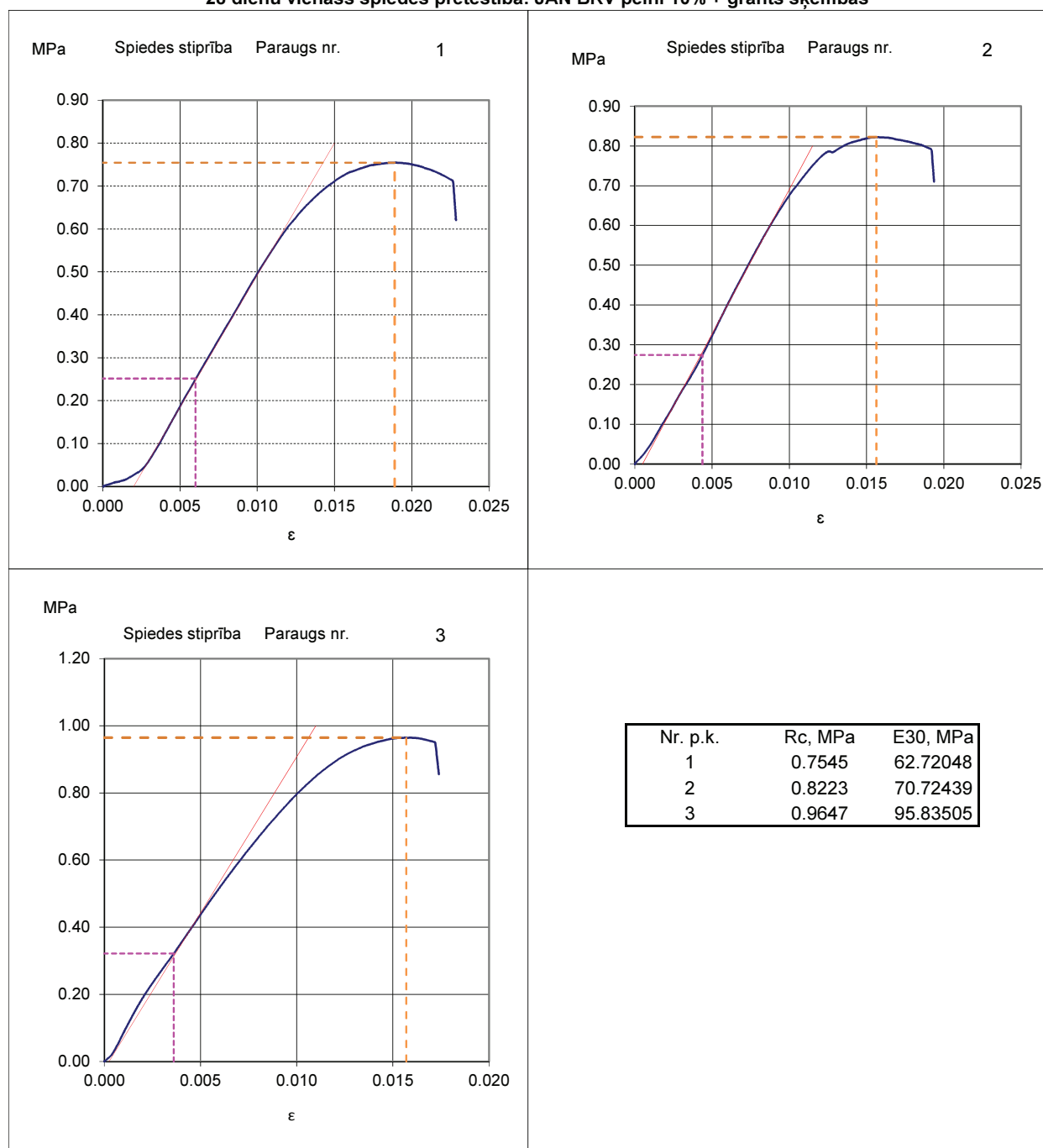


7 dienu vienass spiedes pretestība: JAN BKV pelni 30% + grants šķembas

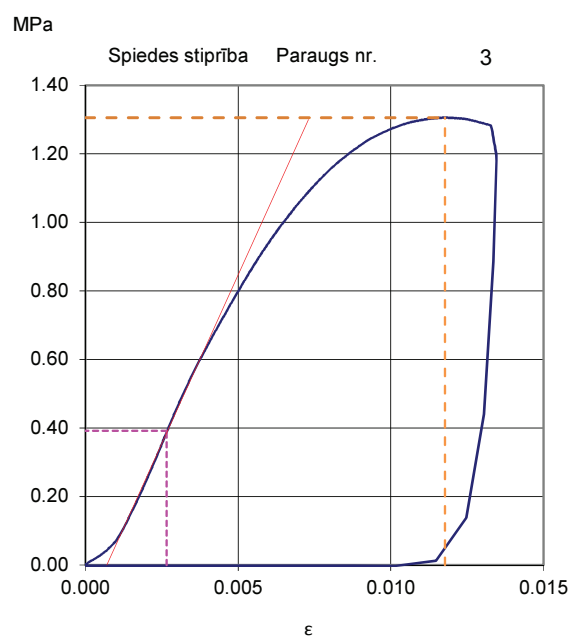
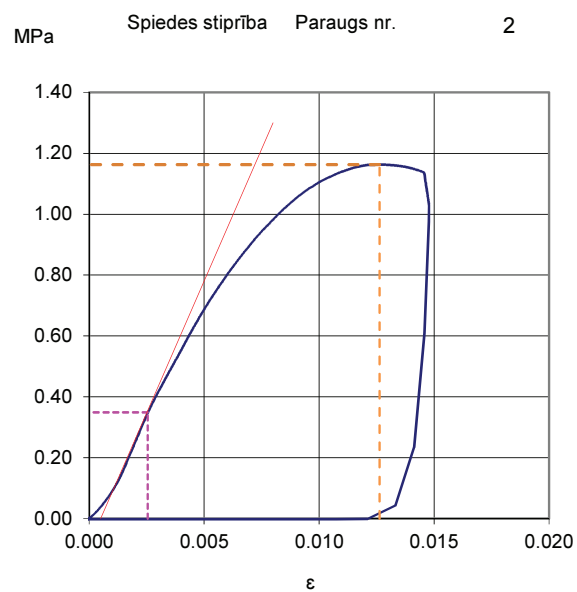
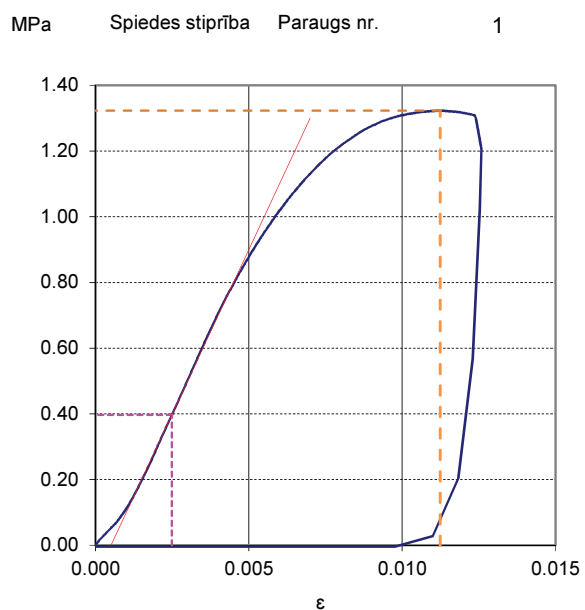


Nr. p.k.	Rc, MPa	E30, MPa
1	0.6794	74.47989
2	0.6317	59.84221
3	0.6046	55.23409

28 dienu vienass spiedes pretestība: JAN BKV pelni 10% + grants šķembas

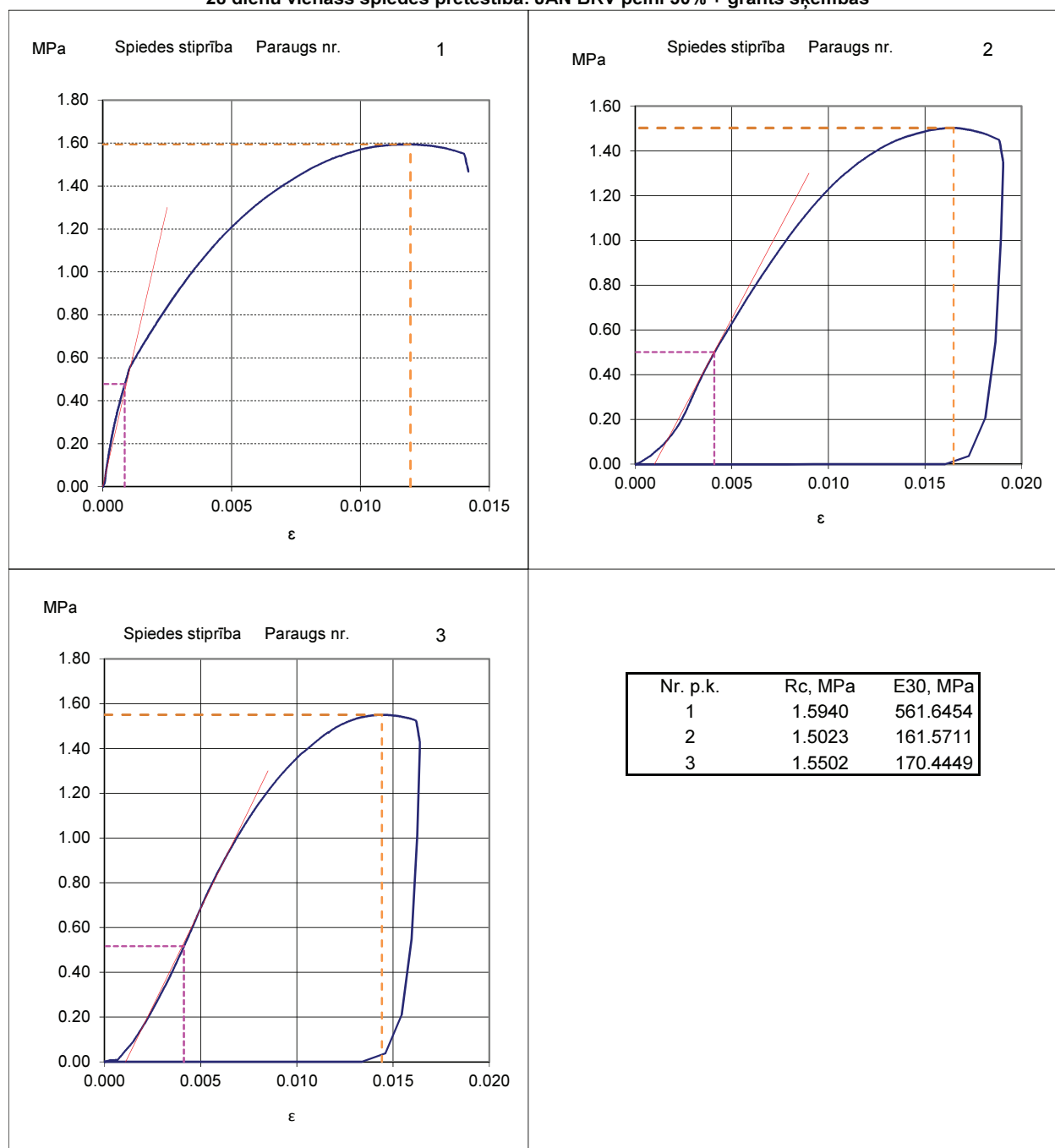


28 dienu vienass spiedes pretestība: JAN BKV pelni 20% + grants šķembas

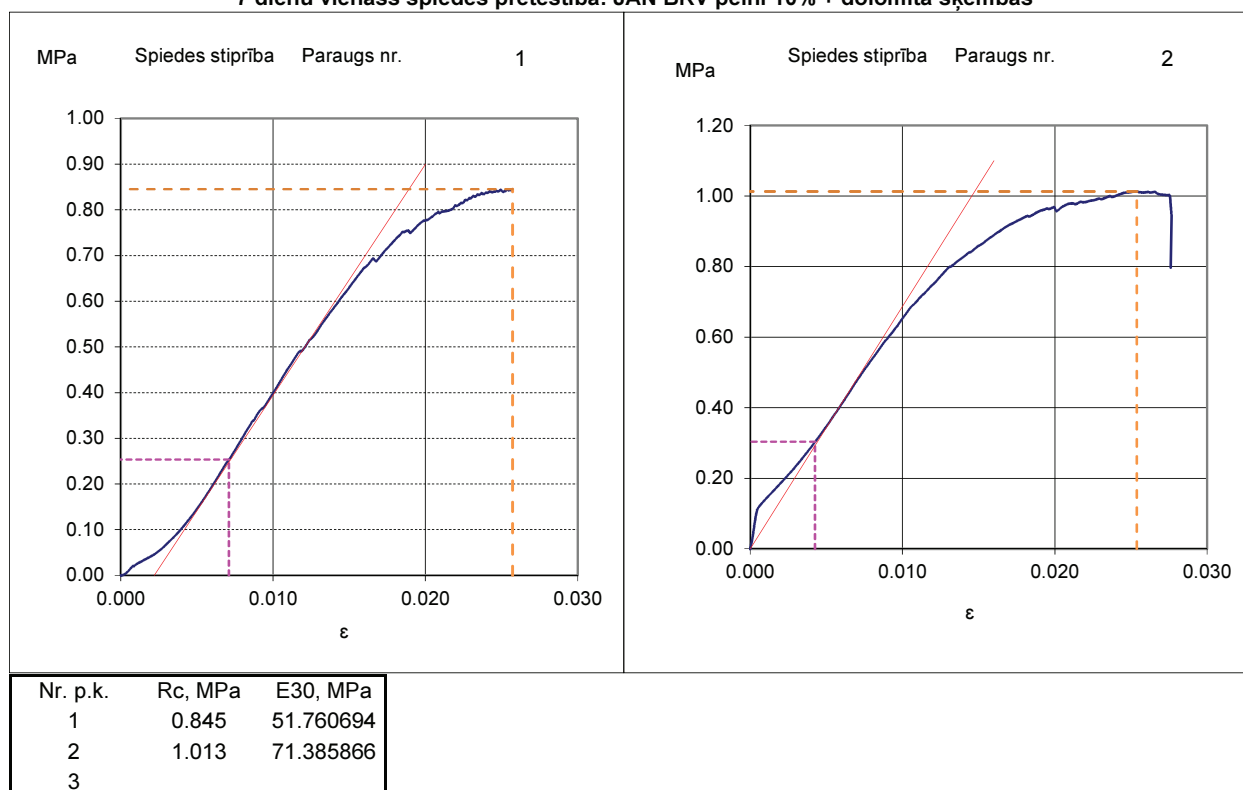


Nr. p.k.	R _c , MPa	E ₃₀ , MPa
1	1.3227	199.3417
2	1.1629	170.4722
3	1.3057	199.7103

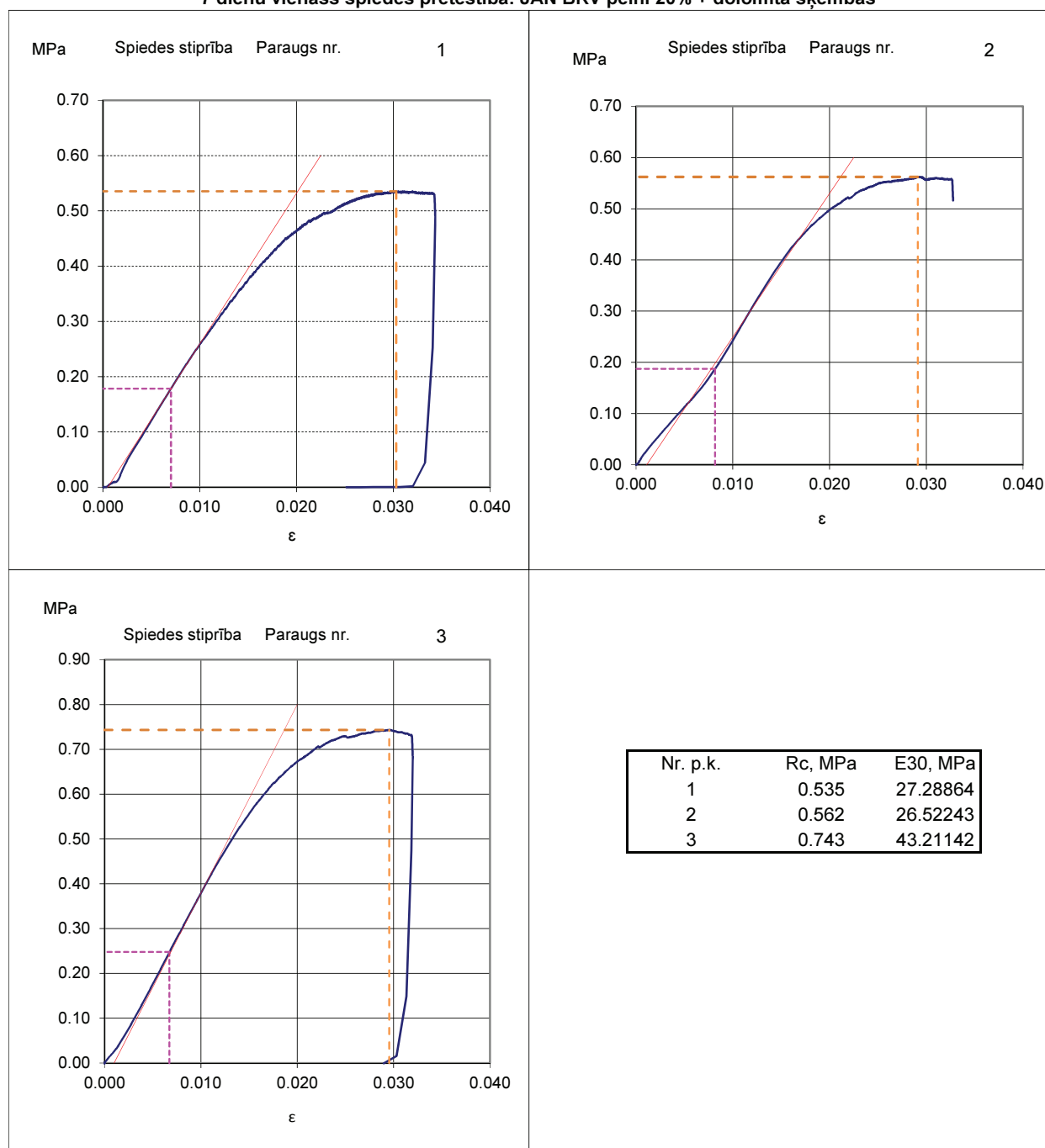
28 dienu vienass spiedes pretestība: JAN BKV pelni 30% + grants šķembas



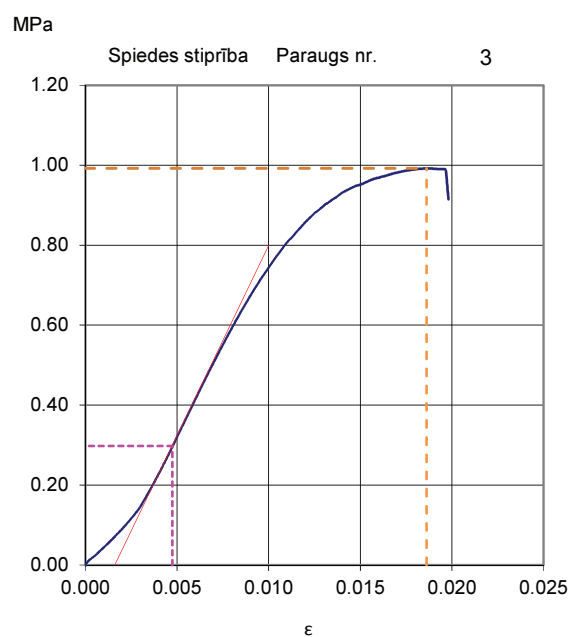
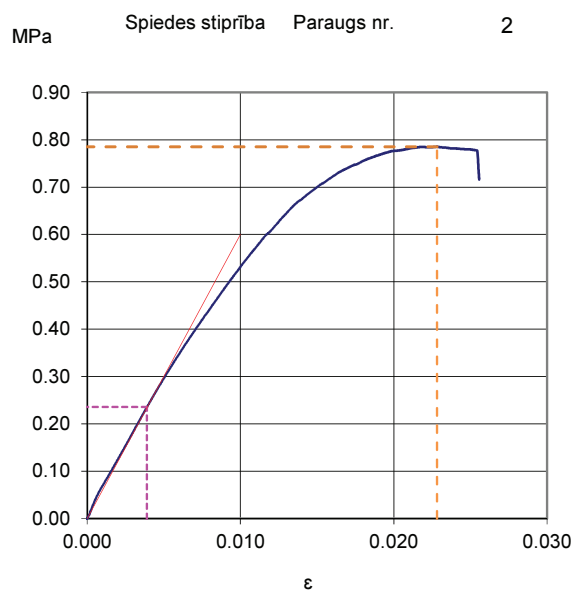
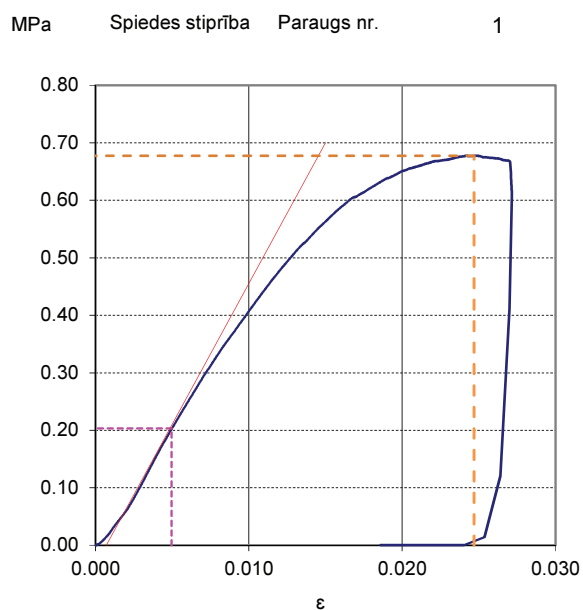
7 dienu vienass spiedes pretestība: JAN BKV pelni 10% + dolomīta šķembas



7 dienu vienass spiedes pretestība: JAN BKV pelni 20% + dolomīta šķembas

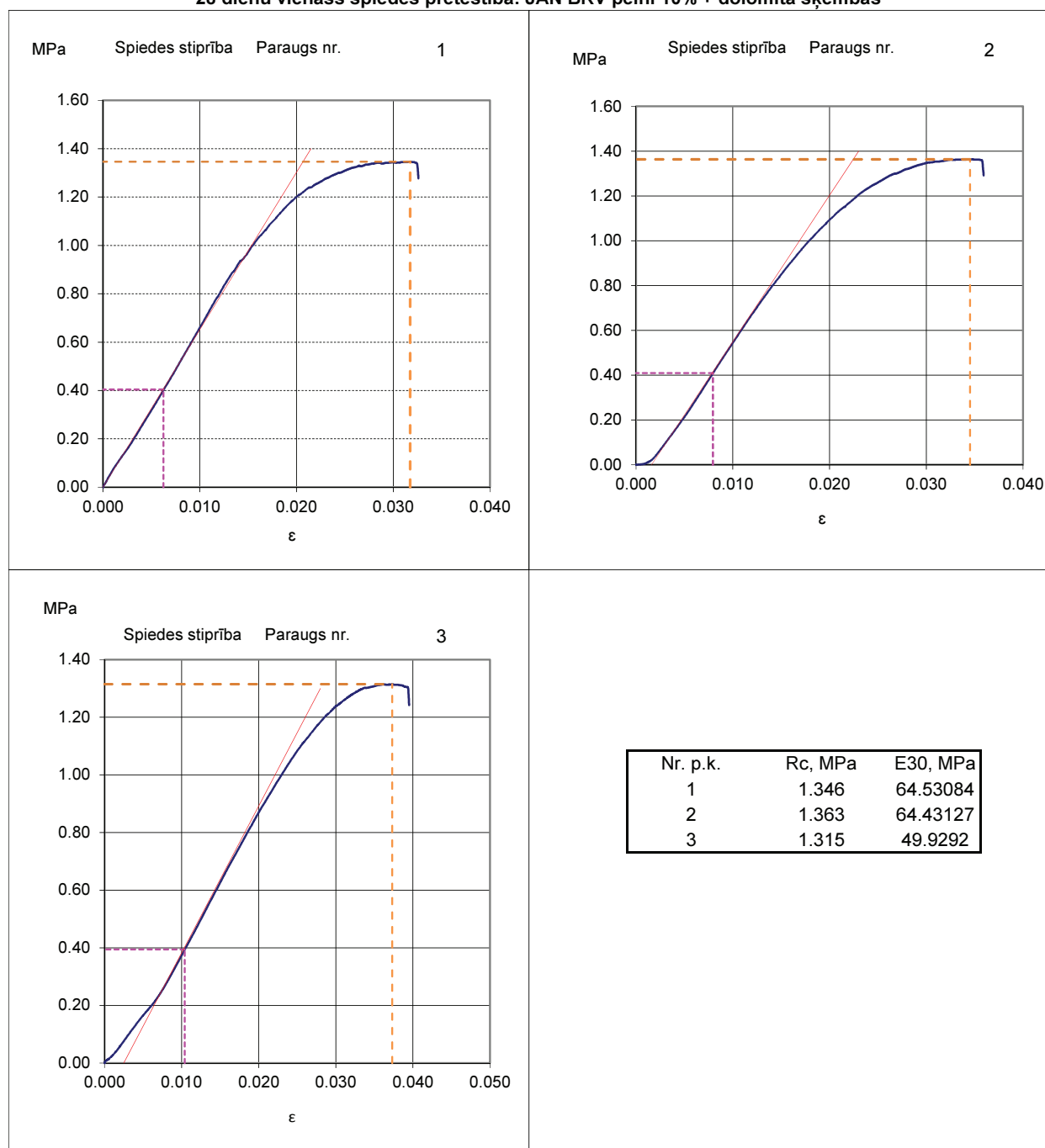


7 dienu vienass spiedes pretestība: JAN BKV pelni 30% + dolomīta šķembas

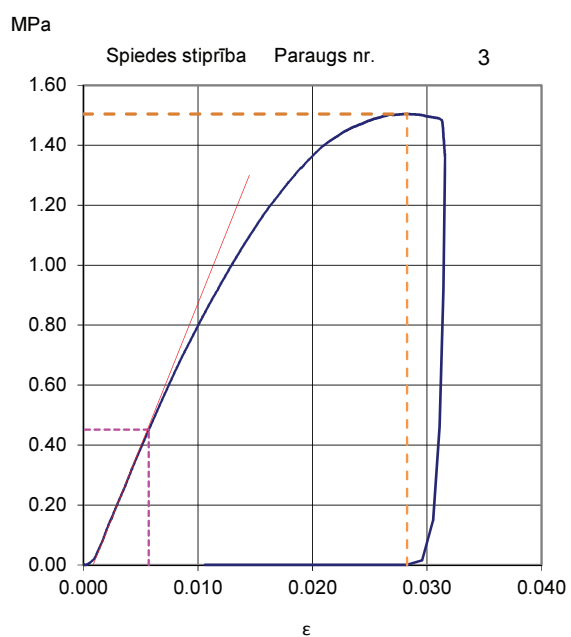
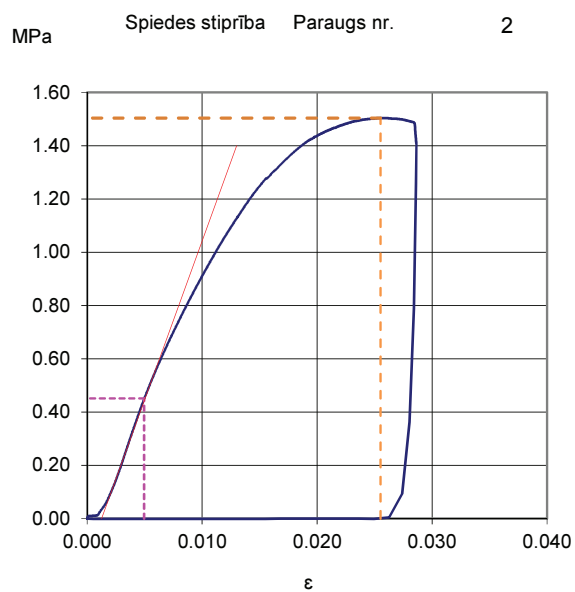
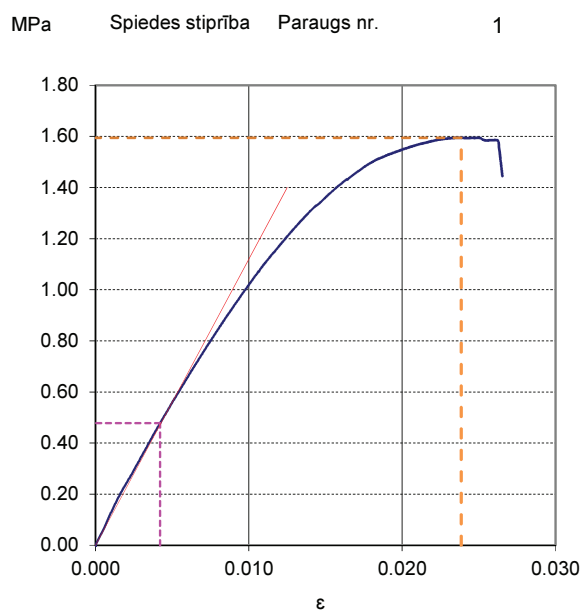


Nr. p.k.	R _c , MPa	E ₃₀ , MPa
1	0.677	47.64216
2	0.785	60.5267
3	0.992	94.62942

28 dienu vienass spiedes pretestība: JAN BKV pelni 10% + dolomīta šķembas



28 dienu vienass spiedes pretestība: JAN BKV pelni 20% + dolomīta šķembas



Nr. p.k.	R _c , MPa	E ₃₀ , MPa
1	1.595	113.6734
2	1.504	121.7514
3	1.504	93.05415

28 dienu vienass spiedes pretestība: JAN BKV pelni 30% + dolomīta šķembas

