

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ROAD STRUCTURES

SROVNÁNÍ ZKOUŠKY PENETRACE JEHLOU A PENETRACE KUŽELEM ASFALTŮ MODIFIKOVANÝCH PRYŽOVÝM GRANULÁTEM

THE COMPARISON OF NEEDLE PENETRATION AND CONE PENETRATION TEST OF ASFALT
RUBBERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN SYCHRA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. JAN KUDRNA, CSc.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Martin Sychra
Název	Srovnání zkoušky penetrace jehlou a penetrace kuželem asfaltů modifikovaných pryžovým granulátem
Vedoucí bakalářské práce	prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2013
Datum odevzdání bakalářské práce	30. 5. 2014

V Brně dne 30. 11. 2013

.....
doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení penetrace jehlou

ČSN EN 13880-2 Zálivky za horka - Část 2: Zkušební metoda pro stanovení penetrace kuželem při 25 °C

V. Musil: Laboratorní vlastnosti asfaltových poživ vhodných pro zálivkové hmoty a asfaltové membrány, Bakalářská práce, 2013

Zásady pro vypracování

Určení základních laboratorních vlastností asfaltů modifikovaných pryžovými granuláty odebraných z mísicího zařízení na obalovně. Stanovení závislosti zkoušky penetrace jehlou a penetrace kuželem vybraných poživ.

Předepsané přílohy

.....

prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

V bakalářské práci jsou určeny výsledky laboratorních vlastností asfaltů modifikovaných pryžovými granuláty (dynamická viskozita, penetrace jehlou, penetrace kuželem, bod měknutí, resilience a vratná duktilita) a popsány vzájemné závislosti jednotlivých zkoušek.

KLÍČOVÁ SLOVA

Asfalt, pryžový granulát, asfalt modifikovaný pryžovým granulátem, penetrace jehlou, penetrace kuželem, dynamická viskozita.

ABSTRACT

The laboratory properties of crumb rubber modified bitumens (dynamic viscosity, needle penetration, cone penetration, softening point, resilience and elastic recovery) are determined in bachelor's thesis. The relationship between these properties is described.

KEYWORDS

Bitumen, rubber granulate, crumb rubber modified bitumen, needle penetration, cone penetration, dynamic viscosity.

SYCHRA, M. Srovnání zkoušky penetrace jehlou a penetrace kuželem asfaltů modifikovaných pryžovým granulátem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Ústav pozemních komunikací, 2014. 56 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a všechny informační zdroje a odbornou literaturu jsem řádně uvedl v seznamu použité literatury.

V Brně dne.....

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych zde vyjádřil poděkování vedoucímu své bakalářské práce prof. Ing. Janu Kudrnovi, CSc., dále Ing. Ondřeji Daškovi a všem zaměstnancům školní laboratoře VUT FAST, zvláště Matěji Šafránkovi za odbornou pomoc a velmi cenné rady při zpracovávání této bakalářské práce.

V Brně dne.....

.....

(podpis autora)

OBSAH

1. Úvod	9
2. Rešerše literatury	10
3. Cíle práce	12
4. Metodika řešení	13
5. Použité zkušební metody	15
5.1 <i>Dynamická viskozita</i>	15
5.2 <i>Stanovení penetrace jehlou</i>	15
5.3 <i>Stanovení penetrace kuželem</i>	16
5.4 <i>Stanovení penetrace a pružné regenerace (resilience)</i>	18
5.5 <i>Stanovení vratné duktility</i>	19
5.6 <i>Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička</i>	20
5.7 <i>Technické podmínky</i>	21
6. Výsledky zkoušek	24
6.1 <i>Dynamická viskozita</i>	24
6.2 <i>Stanovení penetrace jehlou</i>	25
6.3 <i>Stanovení penetrace kuželem</i>	27
6.4 <i>Stanovení penetrace a pružné regenerace (resilience)</i>	29
6.5 <i>Stanovení vratné duktility</i>	31
6.6 <i>Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička</i>	32
6.7 <i>Celkové zhodnocení výsledků zkoušek</i>	33
6.8 <i>Korelace mezi výsledky zkoušek</i>	34
7. Závěr	51
8. Seznam použité literatury	53

1. Úvod

V posledních letech jistě každý upozoroval stále silnější zatížení pozemních komunikací a to jak v ČR, tak i ve světě. Proto místo klasických asfaltových pojiv, které mnohdy nedosahují uspokojivých výsledků, používáme pojiva modifikovaná. Jedná se o asfaltová pojiva, jejichž fyzikální a mechanické vlastnosti byly upraveny aditivami. Jedním z takových pojiv je asfalt modifikovaný pryžovým granulátem (CRmB). [1]

Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem je pojivo složené ze silničního asfaltu, pryžového granulátu a eventuálně dalších přísad. Jako pryžový granulát se používají rozemleté ojeté pneumatiky. Podíl pryžového granulátu je 15 % – 20 % z celkové hmotnosti asfaltového pojiva. CRmB je ve srovnání s ostatními pojivy pružnější a vykazuje delší životnost a vyšší odolnost vůči nízkým i vysokým teplotám, navíc dobře odolává účinkům vody a výborně eliminuje mrazové a reflexní trhliny. [2] [3]

2. Rešerše literatury

První použití směsí s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem (dále směsí s CRmB) je v ČR registrováno v letech 1985 až 1987. Vývoj takových směsí pokračoval technologií nazvanou Rubit® (tzv. mokrý proces) v letech 1998 až 2002. Díky nemožnosti kontrolovat výrobní proces a z toho vyplývající nízké životnosti provedených úprav bylo využití této technologie zastaveno. Až od roku 2006 se znovu rozběhl vývoj asfaltových směsí s přídavkem pryžového granulátu a to díky nové technologii výroby ve speciálním míchacím zařízení zachyceném na obrázku 1 (tzv. mokrý proces), na jejímž vývoji se podílela Fakulta stavební Vysokého učení technického v Brně. [2]



Obr. 1 Mísící zařízení připojené na obalovnu [4]

Speciální míchací zařízení používané v ČR je známo také pod zkráceným názvem „blender“. Jedná se o mobilní zařízení, které může být umístěno na místě připojené na obalovnu (Obr. 1) nebo usazené na běžném návěsu délky 13,50 m. Zařízení se skládá ze třech hlavních částí:

- a) Dávkovací násypky pryžového granulátu
- b) Mísící nádrže určené pro smísení silničního asfaltu a pryžového granulátu
- c) Reakční nádrže, ve které dochází k reakci pryžového granulátu se silničním asfaltem [4]

Pojivo je tedy v mísicím zařízení postupně zahušťováno granulátem, který následně bobtná. Průběh míchání a reakce při teplotě 175 °C až 190 °C trvá přibližně 45 až 90 minut. Reakce mezi pryží a asfaltem výrazně mění vlastnosti pojiva. Zvyšuje hodnotu viskozity, snižuje hodnotu penetrace a zvyšuje bod měknutí. [3]

Výhodou použití CRmB je z hlediska bezpečnosti na pozemních komunikacích zkrácení brzdné dráhy, snížení rizika smyku, omezení vzniku trhlin a trvalých deformací ve stopách vozidel. Další z výhod je ekologické využití ojetých pneumatik a snížení hladiny hluku. Jen pro představu, na tunu asfaltového pojiva se spotřebuje 50 pneumatik z osobních aut, což odpovídá jedné pneumatice uložené do 3 m² obrusné vrstvy o tloušťce 30 mm. Z ekonomického hlediska je výstavba a oprava vozovek levnější díky menší potřebné tloušťce obrusné vrstvy. Jak bylo již zmíněno v předchozí kapitole, CRmB má navíc delší životnost oproti klasickým asfaltovým pojivům. Nevýhodou CRmB je vyšší pracnost, energetická a organizační náročnost a nižší operativnost obaloven. [2] [3]

3. Cíle práce

Cílem práce bylo určení základních laboratorních vlastností asfaltů modifikovaných pryžovými granuláty, které byly odebrány z mísícího zařízení na obalovně. Dalším z hlavních úkolů bylo stanovení závislosti zkoušky penetrace jehlou a penetrace kuželem vybraných pojiv. Dále bylo provedeno několik dodatečných zkoušek, které doplnily informace o vybraných pojivech. Následně byly všechny naměřené hodnoty jednotlivých zkoušek zpracovány a zjištěny vzájemné závislosti. Zkoušky byly prováděny podle následujících norem.

ČSN EN 13302	Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení dynamické viskozity asfaltových pojiv rotačním vřetenovým viskozimetrem [5]
ČSN EN 1426	Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou [6]
ČSN EN 13880-2	Zálivky za horka – Část 2: Zkušební metoda pro stanovení penetrace kuželem při 25 °C [8]
ČSN EN 13880-3	Zálivky za horka – Část 3: Zkušební metoda pro stanovení penetrace a pružné regenerace (resilience) [9]
ČSN EN 13398	Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení vratné duktility modifikovaných asfaltů [10]
ČSN EN 1427	Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička [11]

4. Metodika řešení

Zkoušené vzorky CRmB byly odebrány z mísicího zařízení na obalovnách při výrobě asfaltových směsí s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem. Tyto CRmB obsahovaly 15 % – 16 % pryžového granulátu. U jednotlivých vzorků byly změřeny dynamické viskozity přímo při odběru na obalovnách a pak před samotným zkoušením vzorků znovu v laboratoři. Vzorky CRmB jsou charakterizovány společně s naměřenými hodnotami dynamických viskozit v tabulce 1.

Vzorek	Popis	Dynamická viskozita [Pa·s]	
		Obalovna	Laboratoř
1	Obalovna Poříčany - odběr 23:00, 24. 9. 2013; 14,4 % granulátu	2,2	2,5
2	Obalovna Hulín - odběr 6:05, 29. 10. 2013	2,5	2,8
3	Obalovna Poříčany - odběr 14:00, 25. 9. 2013	2,9	3,2
4	Obalovna Hulín - odběr 21:10, 23. 10. 2013	3,3	4,6
5	Obalovna Hulín z váhy - odběr 15:00, 25. 10. 2013	-	2,5
6	Obalovna Hulín, 2. várka - odběr 16:30	2,8	4,0
7	Obalovna Hulín – odběr z dávkování do váhy den po výrobě	-	0,3
8	Obalovna Hulín 13. 10. 2013; 1. várka	-	2,5
9	Obalovna Poříčany - odběr 21:00, 24. 9. 2013; 14,4 % granulátu	1,5	2,6
10	Obalovna Poříčany - odběr 21:00, 24. 9. 2013; 14,4 % granulátu	2,7	2,4
11	Obalovna Hulín – 1. pokládka	-	1,2
12	Obalovna Poříčany 16. 10. 2013, 15,5% granulátu, po noci ohřevu při 167 °C, odběr 5:45	3,8	4,5
13	Obalovna Hulín 28. 10. 2013, odběr 14:50	2,2	3,0
14	Obalovna Tlumačov 12. 11. 2013, odběr 15:30	1,6	2,4
15	Obalovna Topol 19. 11. 2013, odběr 8:00	2,7	3,3

Tab. 1 Zkoušené vzorky s naměřenými viskozitami

Asfalty modifikované pryžovým granulátem se vyznačují poměrně vysokou hodnotou viskozity. Uvažujme nízkou hodnotu viskozity samotného asfaltového pojiva. V čase t_1 přidáme k silničnímu asfaltu pryžový granulát. Od daného okamžiku až do času t_2 (krátký časový úsek) prudce narůstá hodnota viskozity. Od t_2 do t_3 uplyne asi 60 minut, kdy je změřena hodnota viskozity na obalovně. V intervalu od t_2 do t_4 reaguje granulát s pojivem a hodnota viskozity mírně roste. V čase t_4 se růst zastaví a začne viskozita mírně klesat. V předchozí tabulce 1 si můžeme všimnout, že většina viskozit změřených v laboratoři byla větší než viskozity změřené na obalovnách. Což znamená, že při měření viskozit v laboratoři jsme se pohybovali v časovém intervalu $\langle t_3; t_4 \rangle$. U vzorku č. 7 si můžeme všimnout velmi nízké hodnoty dynamické viskozity. S největší pravděpodobností se jednalo o vzorek silničního asfaltu.

U vybraných vzorků byly dále provedeny v laboratoři následující zkoušky:

- a) Stanovení penetrace jehlou
- b) Stanovení penetrace kuželem
- c) Stanovení penetrace a pružné regenerace (resilience)
- d) Stanovení vratné duktility
- e) Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička

5. Použité zkušební metody

5.1 Dynamická viskozita

Dynamická viskozita vyjadřuje míru odporu k toku kapaliny a její jednotka je pascal sekunda ($\text{Pa}\cdot\text{s}$). Ke zjištění dynamické viskozity asfaltových pojiv používáme takzvaný vřetenový rotační viskozimetr. Připravíme si zkušební vzorky do čistých nádob. Vzorky s pojivem zahříváme na předepsanou teplotu v celém objemu zkušebních vzorků ($175\text{ }^{\circ}\text{C}$). Po zahřátí vložíme rotační část viskozimetru (vřeteno) do zkušebního vzorku, necháme hodnotu viskozity ustálit a zaznamenáme výsledek. Dynamickou viskozitu vyjádříme jako aritmetický průměr ze dvou ustálených platných hodnot ze dvou samostatných vzorků. [norma] Pro zjištění hodnoty dynamické viskozity pojiv byl použit digitální rotační vřetenový viskozimetr typu RION, který je zachycen na obr. 2 a při měření viskozity na obr 3. [5]



Obr. 2 Digitální rotační vřetenový viskozimetr typu RION



Obr. 3 Měření dynamické viskozity

5.2 Stanovení penetrace jehlou

Prvním úkolem, ještě před samotným započítím u každé zkoušky, je takzvané vzorkování neboli příprava zkušebních vzorků (obr. 4). Odebraný zkušební materiál se zahřeje na požadovanou teplotu ($80\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ nad předpokládaný bod měknutí) a poté se nalije do připravené zkušební nádoby do výšky minimálně 10 mm větší, než je hloubka předpokládaného vniknutí jehly. Zkušební nádoba se vzorkem se okamžitě přikryje, aby se předešlo znečištění a umožnilo se úniku vzduchových bublinek z horkého vzorku. Analytické

vzorky se chladí za určitých podmínek na požadovanou teplotu. Předpokládaná penetrace byla do 330 x 0,1 milimetrů, a proto zkušební teplota byla zvolena 25 °C. Po vzorkování se může přejít ke zkoušení vzorku (obr. 5). Řádně se očistí zkušební jehla a vloží se do vodícího zařízení. Celkové aplikované zatížení musí být $100,00 \text{ g} \pm 0,10 \text{ g}$. Jelikož zkouška probíhala v lázni s řízenou konstantní teplotou, nádoba s analytickým vzorkem se umístí přímo na ponořenou policičku penetrometru tak, aby byla zcela pokryta vodou. Měření se provádí v místech minimálně 10 mm od okraje vzorku a minimálně 10 mm od sebe. Potom se opatrně snižuje jehla tak, aby se její hrot právě dotkl svého odrazu na hladině pojiva. Zaznamená se nulová hodnota jehly a uvolní se držák jehly na specifikovanou hodnotu, která činí 5 s. Odečte se hodnota penetrace prvního stanovení. Stanovují se 4 výsledky s tím, že se do průměru nejnížší naměřená penetrace nezapočítává. Aritmetický průměr se zaokrouhlí na nejbližší celé číslo. [6] [7]



Obr. 4 Vzorkování – penetrace jehlou

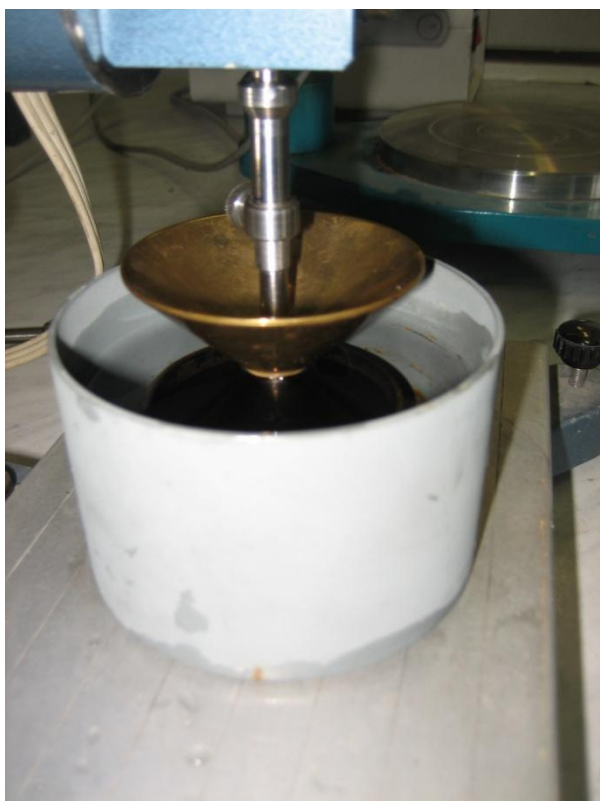


Obr. 5 Penetrometr – penetrace jehlou

5.3 Stanovení penetrace kuželem

Opět se provede vzorkování, které je z velké části stejné jako vzorkování u zkoušky Stanovení penetrace jehlou. Stejně jako v předchozím případě se odebere zkušební materiál, který se následně zahřeje na požadovanou teplotu, nalije se do připravené čisté nádoby,

přikryje se a nechá se chladnout na vzduchu po dobu $(1,75 \pm 0,25)$ h při teplotě (23 ± 2) °C. Vzniklá zkušební tělesa spolu s přepravní nádobou se temperují ve vodní lázni dalších $(1,75 \pm 0,25)$ h. Zkušební teplota by měla být $(25,0 \pm 0,3)$ °C. Celkové použité zatížení činilo $(150,0 \pm 0,1)$ g a doba zatížení opět 5,0 s s možnou odchylkou 0,1 s. Zkušební těleso se umístí do nádoby tak, aby nad ním byla vrstva vody o mocnosti alespoň 50 mm. Jako voda v lázni byla použita voda destilovaná. Po uplynutí doby ponoření se zkušební vzorek vloží do přepravní nádoby s vodou z lázně. Dbá se na to, aby byl vzorek zcela pod vodou. Přepravní nádoba se zkušebním tělesem se umístí na podstavec penetrometru a během jedné minuty se provedou měření. Kužel se začne spouštět ke zkušebnímu vzorku tak, aby se jeho hrot právě dotkl svého odrazu na hladině pojiva (obr. 6, obr. 7). Uvolní se kužel na již zmíněnou dobu a zaznamená se hodnota prvního stanovení. Provedou se nejméně 3 platná stanovení v místech umístěných na povrchu zkušebního tělesa minimálně 16 mm od sebe a od kraje právě tohoto vzorku. Hodnoty penetrace se opět vyjádří jako aritmetický průměr s přesností na nejbližších 0,1 mm. [8]



Obr. 6 Detail – penetrace kuželem

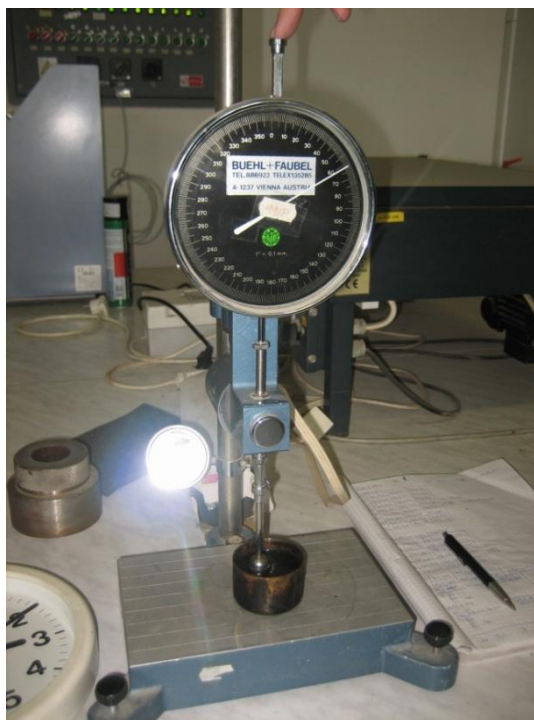


Obr. 7 Penetrometr – penetrace kuželem

5.4 Stanovení penetrace a pružné regenerace (resilience)

Odebere se zkušební materiál a připraví se zkušební tělesa. Po nalití se čisté nádoby ihned přikryjí a nechají se na vzduchu při teplotě $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ po dobu $(1,75 \pm 0,25)$ h. Po ochlazení vzorků se přemístí do vodní lázně a nechají se temperovat opět na dobu $(1,75 \pm 0,25)$ h. Po dokončení temperování se vyjmou nádoby z vodní lázně a ihned se provede zkouška (obr. 8). Zkouška se provádí při zkušební teplotě $(25 \pm 0,1) ^\circ\text{C}$. Vzorek se zatěžuje celkovým zatížením $(75 \pm 0,1)$ g. Na stupnici penetrometru se nastaví nulová hodnota. Kulička penetračního nástavce se umístí tak, aby se právě dotýkal povrchu zkušebního vzorku (obr. 9) a uvolní se zatížení na dobu $(5,0 \pm 0,1)$ s. Odečtená hodnota na stupnici penetrometru s přesností na 0,1 mm nám udává počáteční hodnotu penetrace kuličkou. Po odečtení počáteční hodnoty se pokračuje opětovným uvolněním aretace penetrometru a konstantním stlačením nástavce s kuličkou po dobu 10 s na hodnotu o 100 jednotek (10 mm) větší, než byla odečtená počáteční hodnota. Na této hodnotě se setrvá po dobu 5 s a poté se nechá na vzorek působit pouze zařízení s nástavcem a kuličkou po celou dobu 20 s, kdy probíhá regenerace zkušebního tělesa. Odečte se a zaznamená se hodnota na stupnici penetrometru. Jedná se o konečnou hodnotu penetrace v milimetrech s přesností na 0,1 mm. Provedou se 3 platná stanovení v místech alespoň 10 mm od sebe a od okrajů (obr. 10). Resilience se vypočítá jako součet počáteční hodnoty penetrace v milimetrech a 10 mm. Od tohoto součtu se odečte konečná hodnota penetrace, která je udána opět v milimetrech a vynásobí se zjištěná

hodnota podílem $100/10$. Resilience se udává v procentech a vyjádří se jako průměr ze tří platných stanovení a zaokrouhlí se na nejbližší jedno procento. [9]



Obr. 8 Penetrometr – resilience



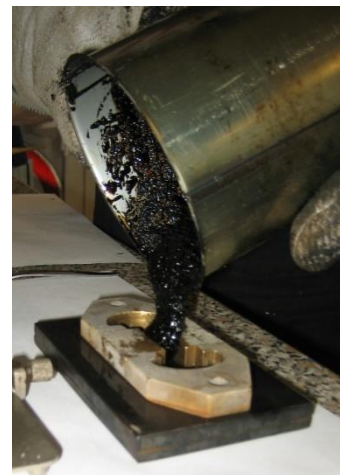
Obr. 9 Detail – resilience



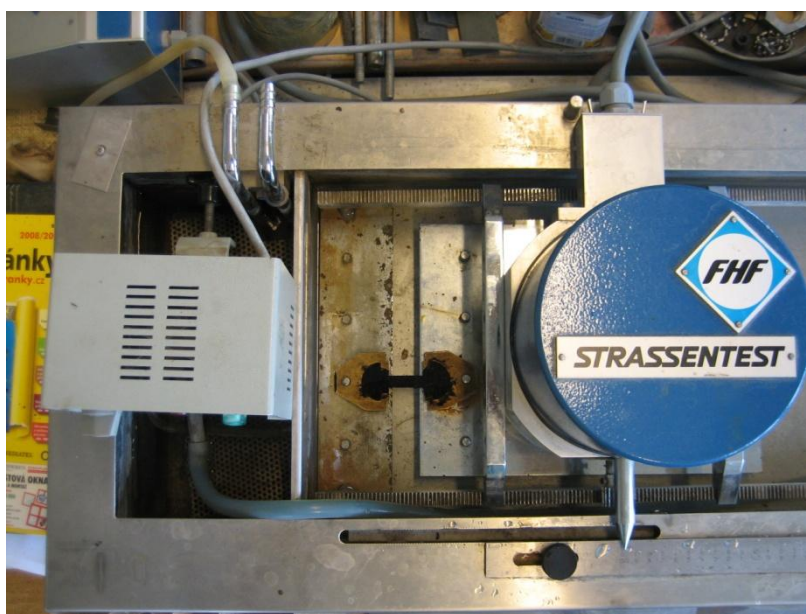
Obr. 10 Výsledné otisky

5.5 Stanovení vratné duktility

Připraví se podkladní destičky a formy, které se na daných místech potřou separačním prostředkem. Odebere se zkušební vzorek a naplní se připravené formy s mírným přebytkem pojiva (obr. 11). Naplněné formy se nechají asi 1 hodinu v laboratorní teplotě. Poté se uchopí nahřátý nůž a odřízne se přebytek pojiva s okrajem zkušební formy. Musí se dávat pozor na porušení zkušebního tělíska. Připravené formy včetně podkladních destiček se vloží do vodní lázně, kde se nechají formy s pojivem temperovat při teplotě $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu $90\text{ minut} \pm 10\text{ minut}$ před začátkem zkoušky. Teplota v lázni byla zajištěna termostatem v zařízení s funkcí cirkulace vody. Do začátku protahování však nesmí uplynout doba $150\text{ minut} \pm 10\text{ minut}$ od naplnění forem. Po uplynutí temperovací doby se sejmou zkušební formy z podkladních destiček a upevní se do protahovacího zařízení (obr. 12). Spustí se protahování vzorků rychlostí $50\text{ mm/min} \pm 2,5\text{ mm/min}$ po takovou dobu, aby se dosáhlo prodloužení vzorků $200\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$. Do 10 s se v půlce protažené vzorky přestříhnou a nechají se netknuté v lázni při zkušební teplotě 30 minut (obr. 13). Po uplynutí doby se změří délky mezi konci polovláken (obr. 14) a vyjádří se výsledné hodnoty v mm. Vratnou duktilitu se vypočte tak, že se podělí vzdálenost mezi polovláknými délkou protažení a výsledek se vynásobí 100. Vzdálenosti se dosazují v mm. Výsledek vratné duktility je vyjádřen v procentech se zaokrouhlením na celé procento (v absolutních hodnotách). [10]



Obr. 11 *Vzorkování – vratná duktilita*



Obr. 12 *Usazení vzorku do protahovacího zařízení*



Obr. 13 *Protažení vzorků na 200 mm*



Obr. 14 *Konečná vzdálenost polovláken*

5.6 Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička

Odeberou se laboratorní vzorky. Zahřejí se dva mosazné kroužky na předepsanou teplotu a umístí se na odlévací destičku potřenou separačním prostředkem. Do obou kroužků se nalije zahřáté pojivo s mírným přebytkem a oba vzorky se nechají chladnout při laboratorní teplotě alespoň 30 minut, ale od nalití vzorků do konce zkoušky však nesmí uplynout více jak 4 hodiny (obr. 16). Po ochlazení vzorků se seřízne nadbytečný materiál horkým nožem s okrajem kroužků. Na připravených zkušebních vzorcích se provede zkouška. V laboratoři jsem využil automatického zařízení (obr. 15), díky kterému se zkouška stává přesnější. Sestaví se tedy zkušební sestava s připravenými kroužky a usadí se do vodní lázně (kádinka s destilovanou vodou) tak, aby byla její hladina minimálně 50 mm nad horním okrajem kroužků. Poté se nechá vodní lázeň včetně zařízení a kroužků zchladit na teplotu $5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nechají se zchladit stejně tak i zkušební kuličky. Po zchlazení všech částí se usadí zkušební kuličky do kroužků a vše se umístí do automatického zařízení, vloží se teploměr do vodní lázně a začne se vodní lázeň zespodu zahřívát rychlostí $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Výsledky měření jsou platné, i když kulička předtím, než se dotkne základní desky, poruší vrstvu, kterou je obalena nebo pokud zpozorujeme odlepení asfaltu od kuličky (obr. 17). Zkouška musí splňovat navíc limitní rozdíl teplot mezi kuličkami, který nesmí být větší než $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro bod měknutí

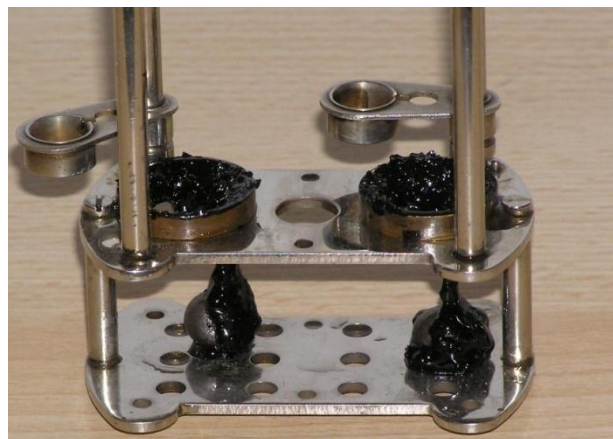
pod 80 °C. Pro bod měknutí menší nebo rovno 80 °C se výsledek zkoušky vyjádří jako průměr naměřených teplot na nejbližších 0,2 °C. [7] [11]



Obr. 15 Automatické zařízení – bod měknutí



Obr. 16 Vzorkování – bod měknutí



Obr. 17 Detail – bod měknutí

5.7 Technické podmínky

V současné době jsou k dispozici dvě verze technických podmínek TP 148. Jedna verze zmíněných technických podmínek je doposud platná, ale zastaralá a druhá je naopak aktualizovaná, ale zatím neschválená. V obou případech se jedná o předpis o hutněných asfaltových vrstvách s pojivem modifikovaným pryžovým granulátem z pneumatik. Výsledky jednotlivých zkoušek byly srovnány požadavky uvedenými v TP 148. Ve své práci jsem pracoval s asfaltovým pojivem s podílem pryžového granulátu 15 % – 25 % z hmotnosti pojiva. Tabulka 2 vystihuje požadavky platných TP 148. Následně tabulka 3 pro srovnání sděluje požadavky prozatím nechválených TP 148. [7] [12]

Pojivo	CRmB	
	<i>I</i>	<i>II</i>
Obvyklé dávkování pryžového granulátu, % z hmotnosti pojiva	5 – 15	15 – 25
Dynamická viskozita, ČSN EN 13302, Pa·s	0,5 až 1,0 ¹⁾ při 150 °C	1,5 až 4,0 při 175 °C
Penetrace 25 °C, ČSN EN 1426, p.j. ²⁾	25 až 75	25 až 75
Bod měknutí, ČSN EN 1427, °C ²⁾	min. 55	min. 55
Resilience při 25 °C, ČSN EN 13880-3, %	min. 20	min. 20
<i>I</i> – CRmB, jehož skladovatelnost se ověřuje postupem podle ČSN EN 13399 3 při teplotě 165 °C po 2 dnech, musí mít po provedené zkoušce rozdíl bodu měknutí z horní a dolní části vzorku $\Delta K K \leq 5$ °C. <i>II</i> – CRmB, jehož skladovatelnost se neposuzuje, se obvykle vyrábí mícháním asfaltu s pryžovým granulátem bez dalších přísad či úprav. Většinou ho nelze přepravovat a zařízení pro modifikaci bývá přímo napojeno na obalovnu asfaltových směsí. Pro případ přepravy CRmB je nutné dodržovat technologické pokyny jeho výrobce týkající se teplot CRmB a způsobu homogenizace. Poznámky: ¹⁾ Informativní hodnota. Při použití přísad mohou mít pojiva podle <i>I</i> viskozitu mírně odlišnou. Výrobce musí v takovém případě deklarovat hodnoty viskozity jím vyrobeného pojiva, které budou ověřovány kontrolními zkouškami. Vlastnosti pojiva a asfaltové směsi musí splnit všechny ostatní požadavky předpisů pro příslušnou vrstvu vozovky. ²⁾ Jednotlivé výsledky zkoušek nesplňují postup podle uvedených ČSN EN. Penetrace se měří na místech hladkých a lesklých a stanovují se 4 výsledky; do průměru se nejnižší naměřená penetrace nezapočítává. Při měření bodu měknutí kulička předtím, než se dotkne základní desky, poruší vrstvu, kterou je obalena, nebo lze pozorovat odlepení asfaltu od kuličky; taková měření jsou platná, pokud splňují podmínku přípustného rozdílu dvou měření.		

Tab. 2 Požadavky – platné TP 148 [7]

Pojivo	CRmB	
	A – nízkoviskózní ³⁾	B – vysokoviskózní ⁴⁾
Obvyklé dávkování pryžového granulátu, % z hmotnosti pojiva	5 – 15	15 – 25
Dynamická viskozita, ČSN EN 13302, Pa·s	0,5 až 2,0 ¹⁾ při 160 °C	1,5 až 4,0 při 175 °C
Penetrace 25 °C, ČSN EN 1426, p.j. ²⁾	25 až 75	25 až 75
Bod měknutí, ČSN EN 1427, °C ²⁾	min. 55	min. 60
Resilience při 25 °C, ČSN EN 13880-3, %	min. 15	min. 20
Hustota pojiva, ČSN EN 15326, Mg·m ⁻³	Deklaruje se	
Poznámky:		
1) Informativní hodnota. Při použití přísad mohou mít nízkoviskózní CRmB viskozitu mírně odlišnou. Výrobce musí v takovém případě deklarovat hodnoty viskozity jím vyrobeného pojiva, které budou ověřovány kontrolními zkouškami. Vlastnosti asfaltové směsi musí splnit všechny požadavky předpisů pro příslušnou vrstvu vozovky.		
2) Pro postupy uvedených zkoušek platí následující odchylky: Penetrace CRmB se měří na místech hladkých a lesklých a stanovují se 4 výsledky; do průměru se nejnižší naměřená penetrace nezapočítává. Při měření bodu měknutí kulička předtím, než se dotkne základní desky, někdy poruší vrstvu CRmB, kterou je obalena, nebo lze pozorovat odlepení CRmB od kuličky; taková měření jsou platná, pokud splňují podmínku přípustného rozdílu dvou měření.		
3) CRmB A lze podrobněji specifikovat např. jako CRmB 45/75-55.		
4) CRmB B lze podrobněji specifikovat např. jako CRmB 25/55-60.		

Tab. 3 Požadavky – neschválené TP 148 [12]

6. Výsledky zkoušek

6.1 Dynamická viskozita

V tabulce 4 jsou zaznamenány výsledky dynamické viskozity stanovené při teplotě 175 °C a srovnány s požadavky TP 148.

Vzorek	Dynamická viskozita [Pa·s]		Splnění podmínek TP 148	
	Obalovna	Laboratoř	Obalovna	Laboratoř
1	2,2	2,5	Ano	Ano
2	2,5	2,8	Ano	Ano
3	2,9	3,2	Ano	Ano
4	3,3	4,6	Ano	Ne
5	-	2,5	-	Ano
6	2,8	4,0	Ano	Ano
7	-	0,3	-	Ne
8	-	2,5	-	Ano
9	1,5	2,6	Ano	Ano
10	2,7	2,4	Ano	Ano
11	-	1,2	-	Ne
12	3,8	4,5	Ano	Ne
13	2,2	3,0	Ano	Ano
14	1,6	2,4	Ano	Ano
15	2,7	3,3	Ano	Ano
Průměr	2,6	2,8	TP 148 1,5 až 4,0	
Minimum	1,5	0,3		
Maximum	3,8	4,6		

Tab. 4 Výsledky dynamické viskozity porovnané s TP 148

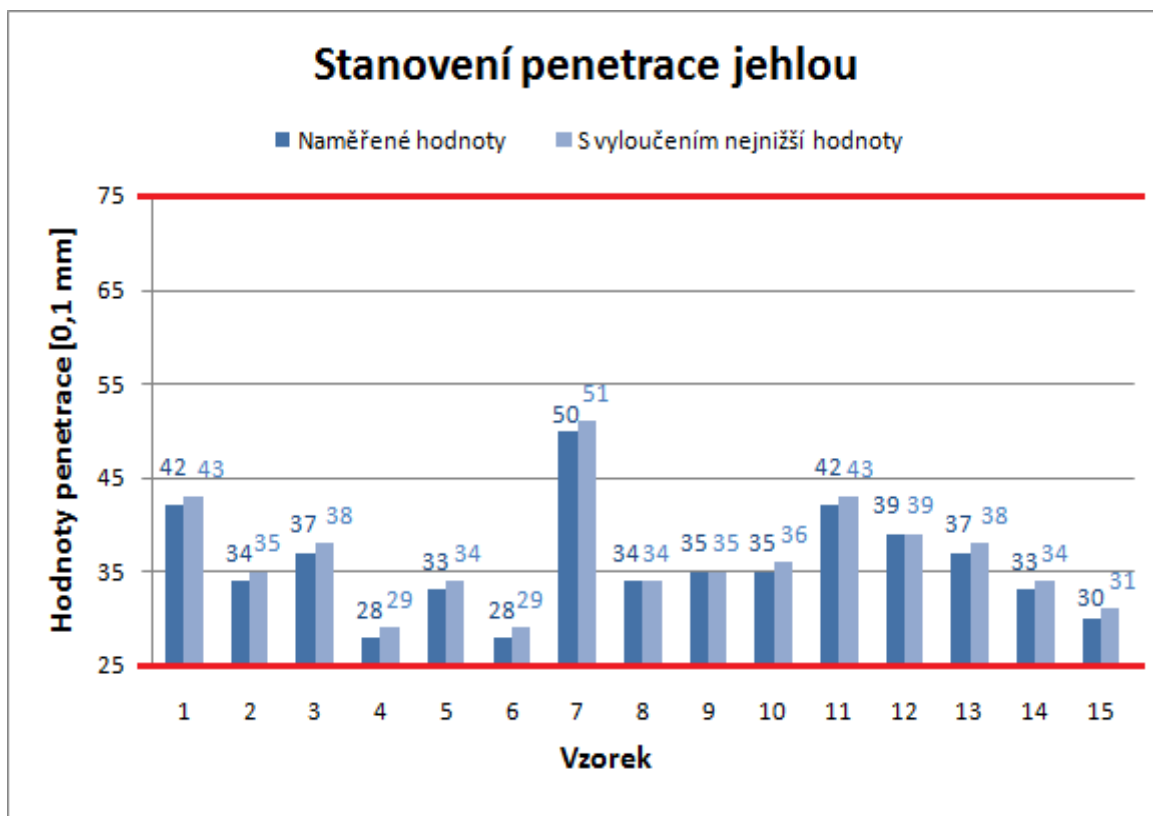
Jak bylo řečeno v 4. Metodika řešení, dynamická viskozita byla nejdříve změřena na obalovnách při jejich dávkování a potom znovu v laboratoři před přípravou zkušebních vzorků. Z tabulky 4 můžeme vidět, že většina hodnot splňuje požadavky technických podmínek TP 148. U vzorku č. 7 se s velkou pravděpodobností jedná pouze o málo modifikované asfaltové pojivo odebrané za nestandardních podmínek až po výrobě asfaltových směsí. U zbývajících třech neshodujících se hodnot můžeme tvrdit, že dané odchylky jsou způsobeny chybami měření a „doreagováním“ silničního asfaltu s pryžovým granulátem v případě stanovení vyšších hodnot v laboratoři a v případě nižších hodnot degradováním pojiva dlouhou dobou vystavení pojiva vysoké teplotě a následným nahříváním pojiva v laboratorní sušárně.

6.2 Stanovení penetrace jehlou

Výsledné hodnoty zkoušky penetrace jehlou jsou seřazeny v tabulce 5 a názorně zobrazeny v grafu 1. Z důvodu lepší přehlednosti bylo výhodné vytvořit graf 1, ze kterého hned na první pohled vidíme, že penetrace všech vzorků splňují hraniční hodnoty 25 až 75 penetračních jednotek. Přičemž minimální hodnota byla 28 p. j. a maximální 42 p. j. Budu-li postupovat podle TP 148 [7] a z naměřených hodnot vyloučím nejnižší hodnotu, ve většině případů se průměrná hodnota logicky nepatrně zvedne. To je patrné i z grafu 1.

Vzorek	Penetrace jehlou [0,1 mm]		Vzorek	Penetrace jehlou [0,1 mm]		Vzorek	Penetrace jehlou [0,1 mm]	
1	40	40	6	28	28	11	42	42
	40	46		29	29		42	42
	46	42		31	31		45	45
	42			25			38	
Průměr	42	43	Průměr	28	29	Průměr	42	43
2	32	32	7	51	51	12	38	38
	37	37		49	49		40	40
	36	36		47	52		38	38
	32			52			38	
Průměr	34	35	Průměr	50	51	Průměr	39	39
3	39	39	8	34	34	13	39	39
	39	39		32	35		35	35
	33	36		35	34		40	40
	36			34			35	
Průměr	37	38	Průměr	34	34	Průměr	37	38
4	30	30	9	35	35	14	33	33
	26	29		35	35		35	35
	29	27		36	36		33	33
	27			34			32	
Průměr	28	29	Průměr	35	35	Průměr	33	34
5	31	35	10	35	35	15	30	30
	35	35		35	35		29	31
	35	32		32	37		31	31
	32			37			31	
Průměr	33	34	Průměr	35	36	Průměr	30	31

Tab. 5 Naměřené hodnoty – penetrace jehlou



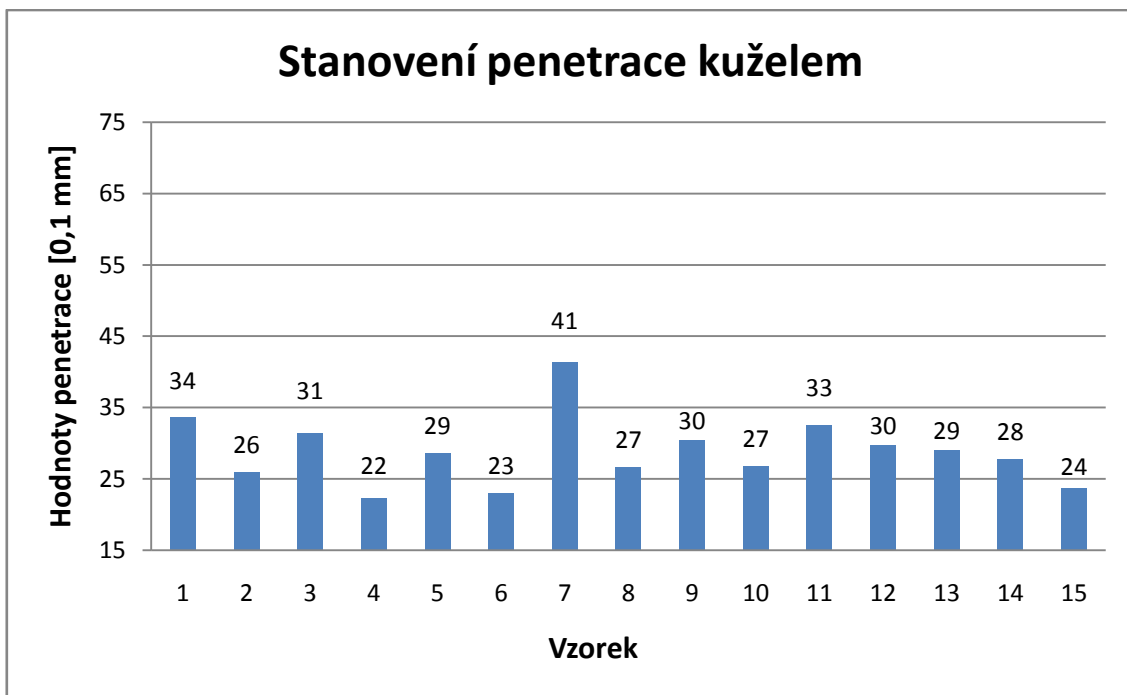
Graf 1 Stanovení penetrace jehlou

6.3 Stanovení penetrace kuželem

Výsledné hodnoty zkoušky jsou opět zobrazeny v tabulce 6. Rozptyl hodnot činil 22 až 34 penetračních jednotek. Pro penetraci kuželem nejsou dány mezní hodnoty jako v ostatních případech. Pro větší přehlednost výsledků jednotlivých asfaltových pojiv byl opět vytvořen graf 2. Při zanedbání vzorku č. 7 průměrná hodnota zkoušky penetrace kuželem byla 28. Průměrná hodnota zkoušky penetrace jehlou činila 35. Nejcitlivěji hodnotí vlastnosti pojiva zkouška penetrace kuželem, o čemž vypovídá hodnota směrodatné odchylky 3,41. U zkoušky penetrace jehlou vychází směrodatná odchylka 4,26.

Vzorek	<i>Penetrace kuželem [0,1 mm]</i>	Vzorek	<i>Penetrace kuželem [0,1 mm]</i>	Vzorek	<i>Penetrace kuželem [0,1 mm]</i>
1	33	6	24	11	34
	34		23		33
	34		22		32
Průměr	34	Průměr	23	Průměr	33
2	25	7	42	12	29
	27		41		31
	26		41		29
Průměr	26	Průměr	41	Průměr	30
3	32	8	26	13	30
	32		28		32
	30		26		26
Průměr	31	Průměr	27	Průměr	29
4	23	9	30	14	28
	21		30		28
	23		30		27
Průměr	22	Průměr	30	Průměr	28
5	29	10	27	15	25
	28		27		23
	29		27		24
Průměr	29	Průměr	27	Průměr	24

Tab. 6 Naměřené hodnoty – penetrace kuželem



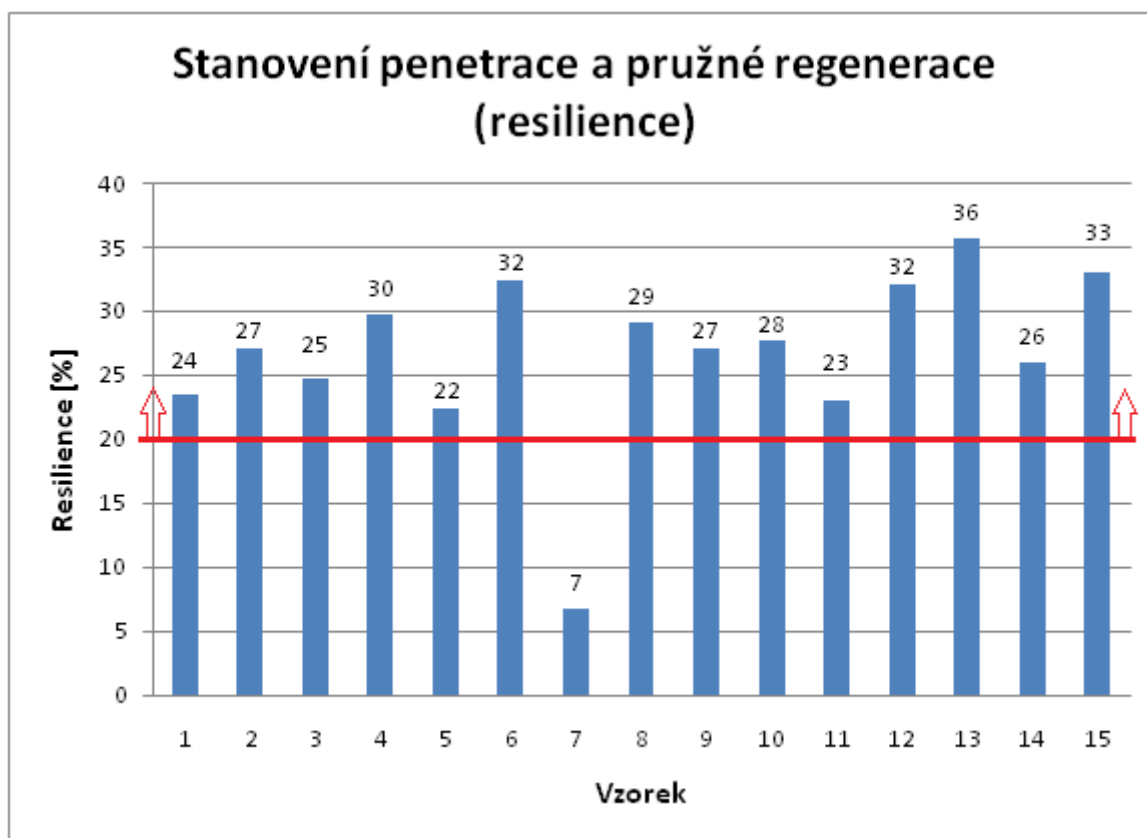
Graf 2 *Stanovení penetrace kuželem*

6.4 Stanovení penetrace a pružné regenerace (resilience)

Následující tabulka 7 ukazuje naměřené hodnoty penetrace a pružné regenerace – resilience (dále jen resilience) třech stanovení u jednotlivých vzorků. Výsledné hodnoty resilience jsou vypočteny podle 5.4 a zaokrouhleny na nejbližší 1 %. Kromě vzorku č. 7 hodnoty pružné regenerace splňují požadavek TP 148, které vykazují minimální hodnotu 20 % u zkoušených asfaltových pojiv. Minimum bylo 22 % a maximum 36 %. Výsledky zkoušky resilience jsou graficky znázorněny v grafu 3.

Vzorek	Naměřené hodnoty				Resilience [%]
1	P	5	5	4	24
	F	81	82	-	
2	P	3	3	3	27
	F	76	76	76	
3	P	3	4	4	25
	F	78	80	79	
4	P	1	2	2	30
	F	71	72	73	
5	P	2	2	2	22
	F	79	81	79	
6	P	2	2	2	32
	F	69	69	71	
7	P	4	5	4	7
	F	97	98	98	
8	P	1	1	2	29
	F	71	72	74	
9	P	2	1	3	27
	F	75	74	76	
10	P	3	2	3	28
	F	75	76	74	
11	P	2	2	1	23
	F	80	78	78	
12	P	3	2	3	32
	F	70	71	71	
13	P	1	1	2	36
	F	74	47	76	
14	P	1	3	3	26
	F	75	77	77	
15	P	2	1	1	33
	F	67	69	69	

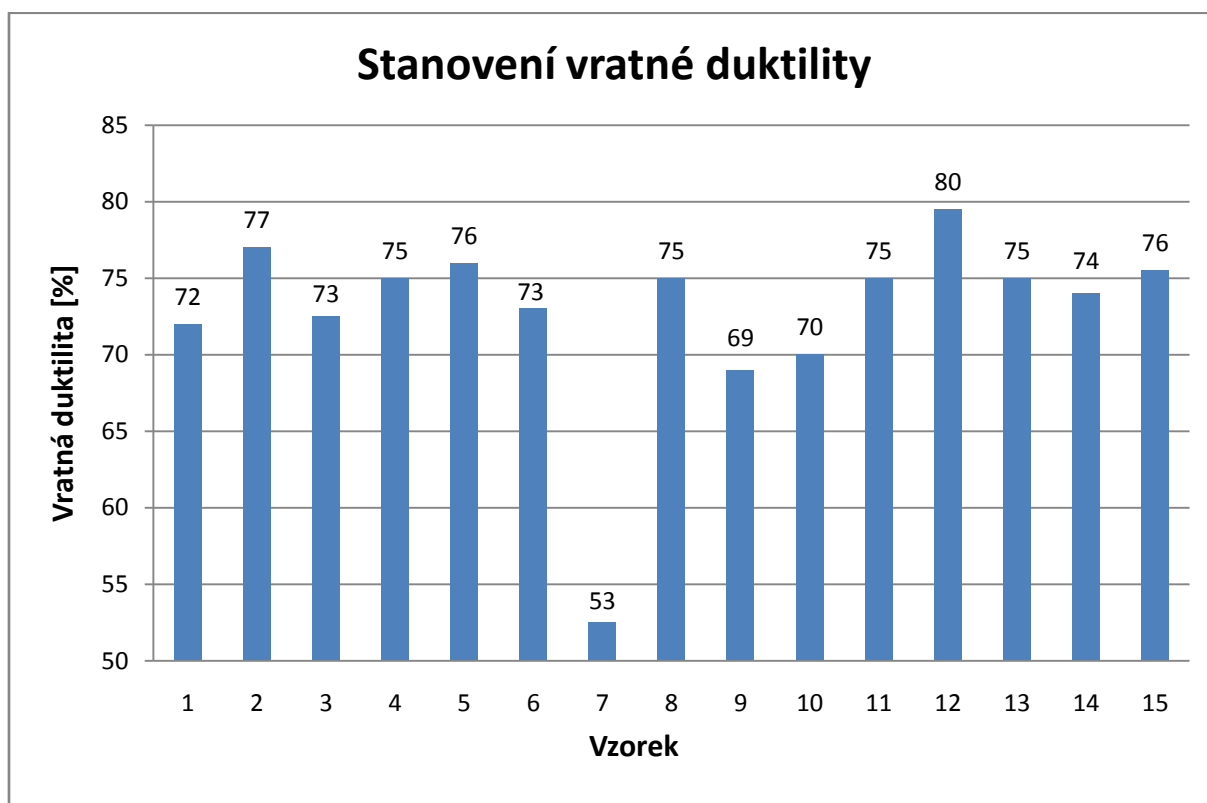
Tab. 7 Naměřené hodnoty – resilience



Graf 3 Stanovení resilience

6.5 Stanovení vratné duktility

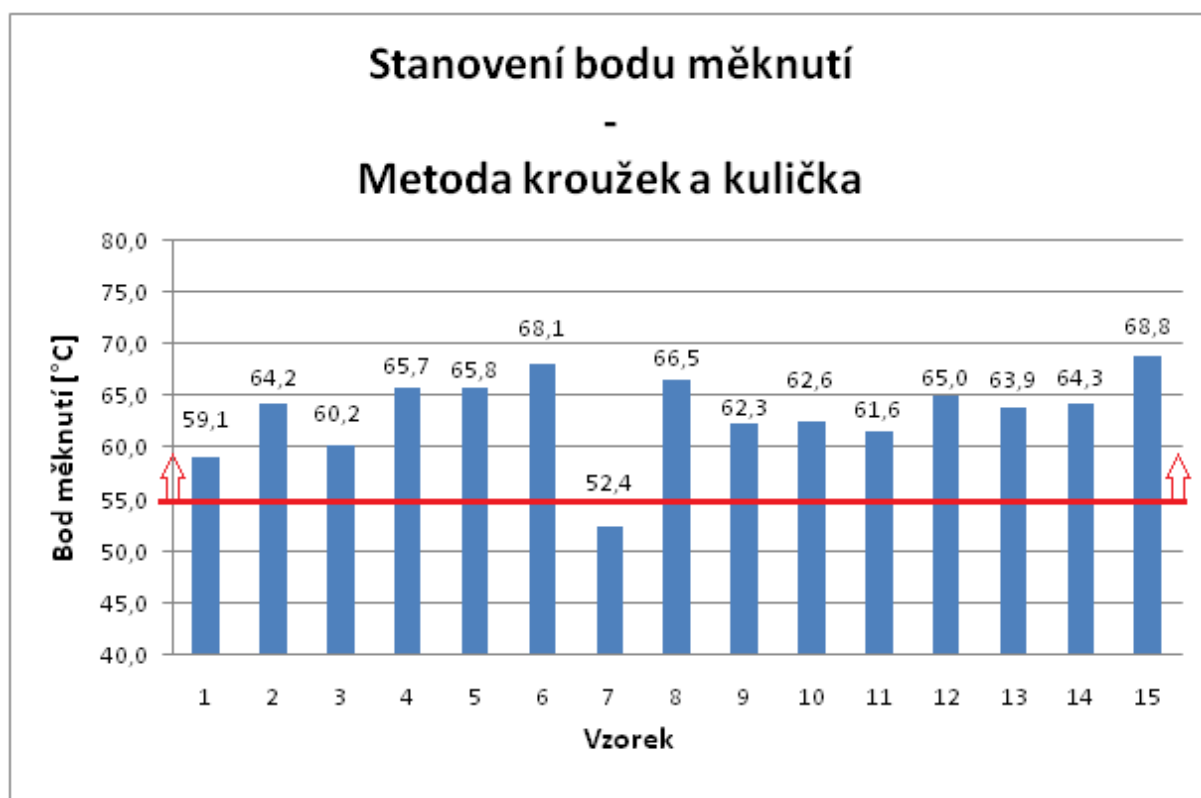
Podle 5.5 vypočteme výsledné hodnoty vratné duktility. Již z předchozích zkoušek jsme si mohli všimnout vzorku č. 7, který svou hodnotou vyčnívá z řady ostatních výsledků. Není tomu jinak ani zde. V technických podmínkách nejsou uvedeny mezní výsledné hodnoty zkoušených asfaltových poživ. Maximální hodnota činila 80 % a minimální hodnota při zanedbání vzorku č. 7 byla 69 % (graf 4).



Graf 4 Stanovení vratné duktility

6.6 Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička

Zde by pro zobrazení výsledků mělo stačit grafické znázornění v grafu 5. Při zanedbání vzorku č. 7 vyhovují dosud platným technickým podmínkám všechny výsledné hodnoty. Minimální a maximální hodnotu bodu měknutí tvořily hodnoty 59,1 °C a 68,8 °C.



Graf 5 Stanovení bodu měknutí

6.7 Celkové zhodnocení výsledků zkoušek

V tabulce 8 je zobrazeno splnění požadavků TP 148 pro jednotlivé vzorky.

Splnění požadavků TP 148						
Zkoušky	<i>Dynamická viskozita</i>	<i>Penetrace jehlou</i>	<i>Penetrace kuželem</i>	<i>Resilience</i>	<i>Vratná duktilita</i>	<i>Bod měknutí</i>
Vzorek						
1	✓	✓	-	✓	-	✓
2	✓	✓	-	✓	-	✓
3	✓	✓	-	✓	-	✓
4	✗	✓	-	✓	-	✓
5	✓	✓	-	✓	-	✓
6	✓	✓	-	✓	-	✓
7	✗	✓	-	✗	-	✗
8	✓	✓	-	✓	-	✓
9	✓	✓	-	✓	-	✓
10	✓	✓	-	✓	-	✓
11	✗	✓	-	✓	-	✓
12	✗	✓	-	✓	-	✓
13	✓	✓	-	✓	-	✓
14	✓	✓	-	✓	-	✓
15	✓	✓	-	✓	-	✓

Tab. 8 Splnění požadavků TP 148

Legenda:

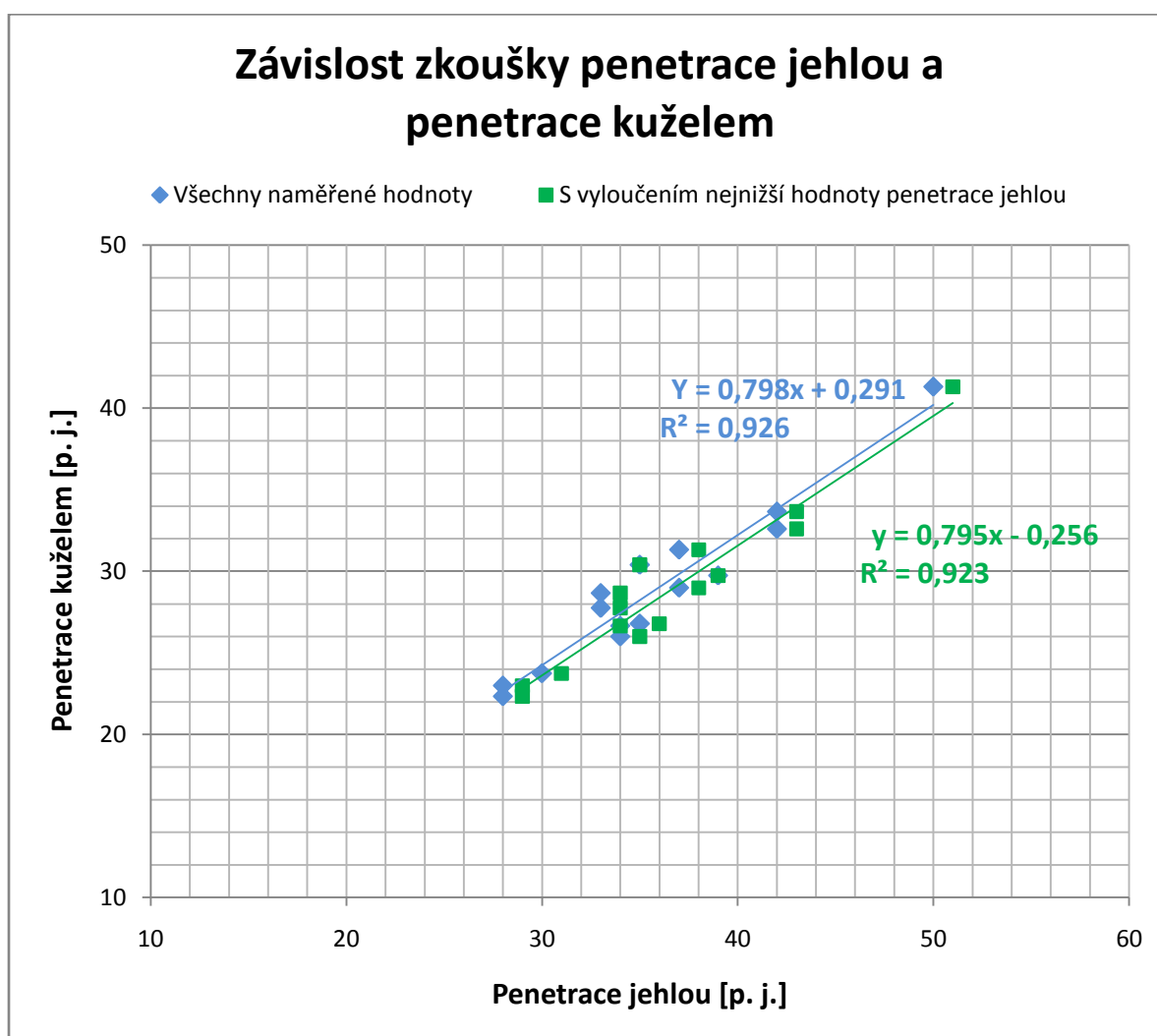
- ✓ VYHOVUJE
- ✗ NEVYHOVUJE
- NEUVEDENO

6.8 Korelace mezi výsledky zkoušek

Druhým z hlavních cílů práce bylo stanovení závislosti výsledků provedených zkoušek, především závislosti zkoušky penetrace jehlou a penetrace kuželem vybraných asfaltových pojiv. Ke splnění tohoto hlavního cíle bude nejvhodnější vynést závislosti do následujících grafů.

a) Závislost zkoušky penetrace jehlou a penetrace kuželem

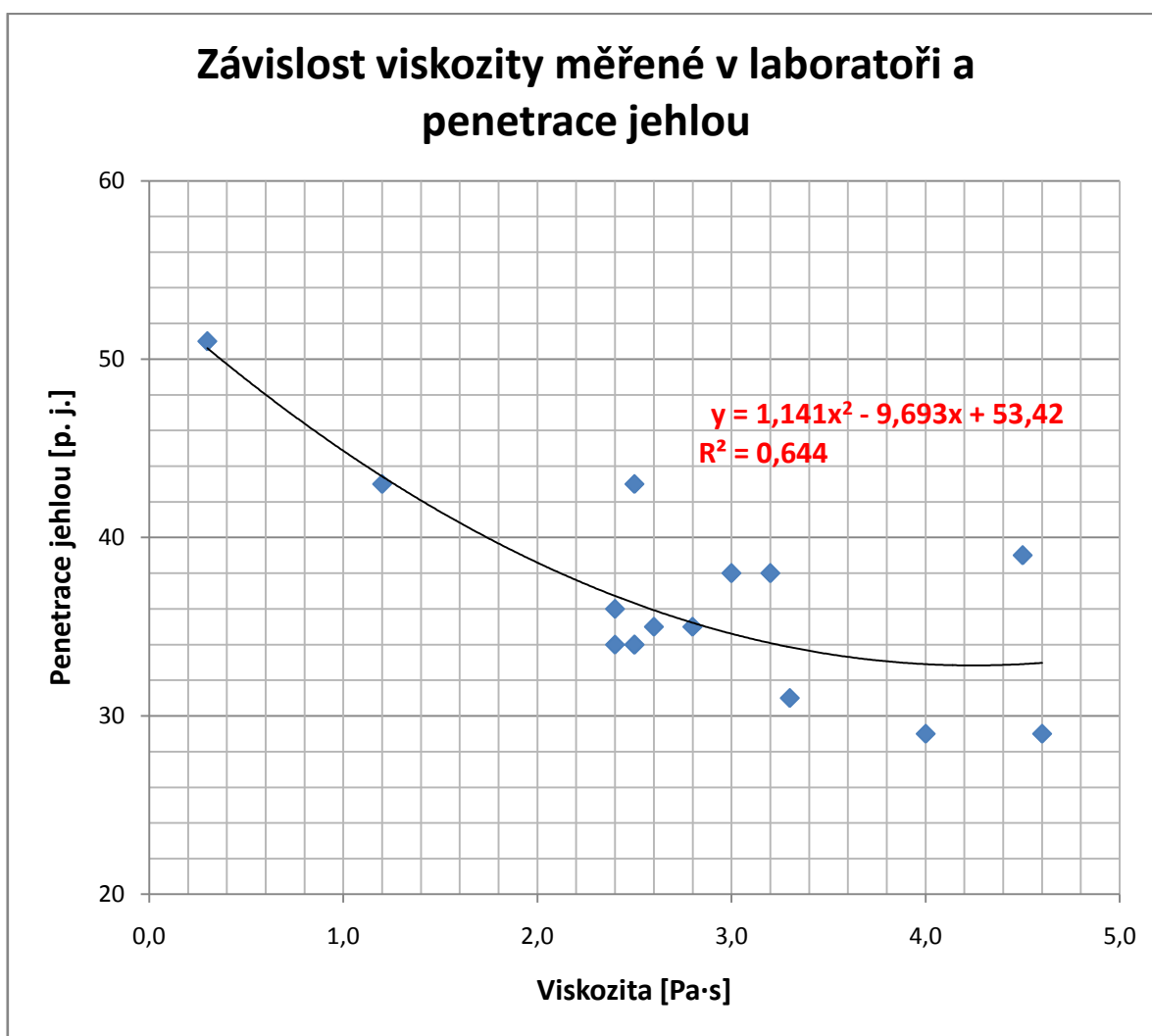
Grafické řešení závislosti jednotlivých zkoušek vyjadřuje silnou závislost mezi penetrací jehlou a penetrací kuželem (graf 6). Při stanovení závislosti se všemi naměřenými hodnotami je závislost určena rovnicí lineární regrese $y = 0,798x + 0,291$ a koeficient korelace $R^2 = 0,926$. Pokud ovšem vyloučíme u penetrace jehlou nejnižší naměřené hodnoty podle TP 148, závislost se nepatrně změní a je určena rovnicí $y = 0,795x - 0,256$ a $R^2 = 0,923$. [7]



Graf 6 Závislost zkoušky penetrace jehlou a penetrace kuželem

b) Závislost viskozity měřené v laboratoři a penetrace jehlou

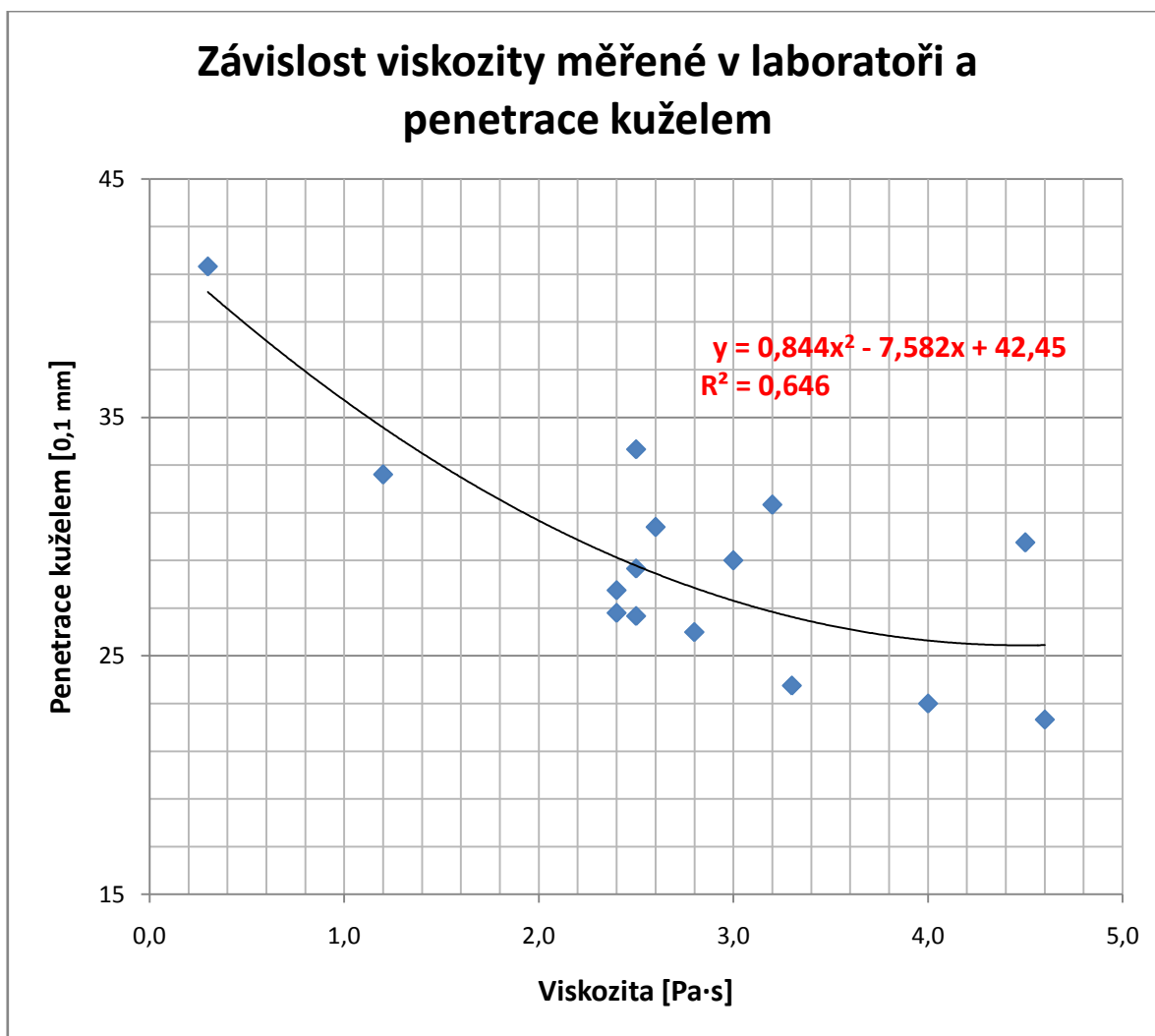
Z důvodu několika neznámých hodnot viskozit měřených na obalovně budou stanoveny pouze závislosti viskozit měřených v laboratoři a ostatních zkoušek. Závislosti viskozity a ostatních zkoušek nevykazují žádnou výraznou závislost (graf 7), o čemž vypovídá součinitel korelace $R^2 = 0,644$. Závislost je dána dále rovnicí polynomické regrese $y = 1,141x^2 - 9,693x + 53,42$. Do stanovení závislosti dynamické viskozity a penetrace jehlou vstupují hodnoty penetrace jehlou s vyloučením nejnižší hodnoty.



Graf 7 Závislost viskozity a penetrace jehlou

c) Závislost viskozity měřené v laboratoři a penetrace kuželem

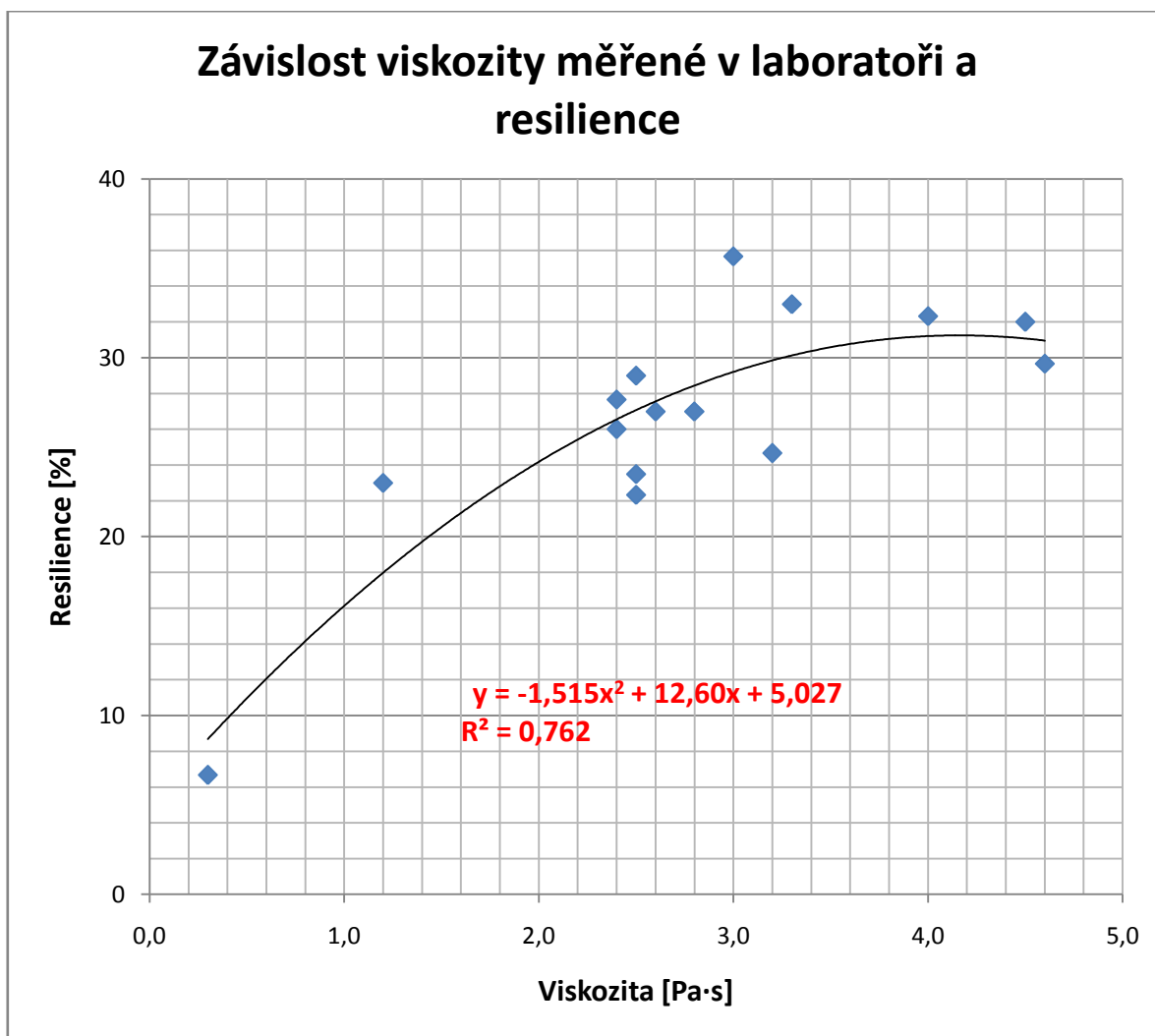
Ani zde není závislost nijak výrazná, součinitel korelace R^2 je 0,646 a závislost je dána opět rovnicí polynomické regrese a je rovna $y = 0,844x^2 - 7,582x + 42,45$ (graf 8). Výsledek je velice podobný předchozí závislosti penetrace jehlou a viskozitou měřenou v laboratoři.



Graf 8 Závislost viskozity a penetrace kuželem

d) Závislost viskozity měřené v laboratoři a resilience

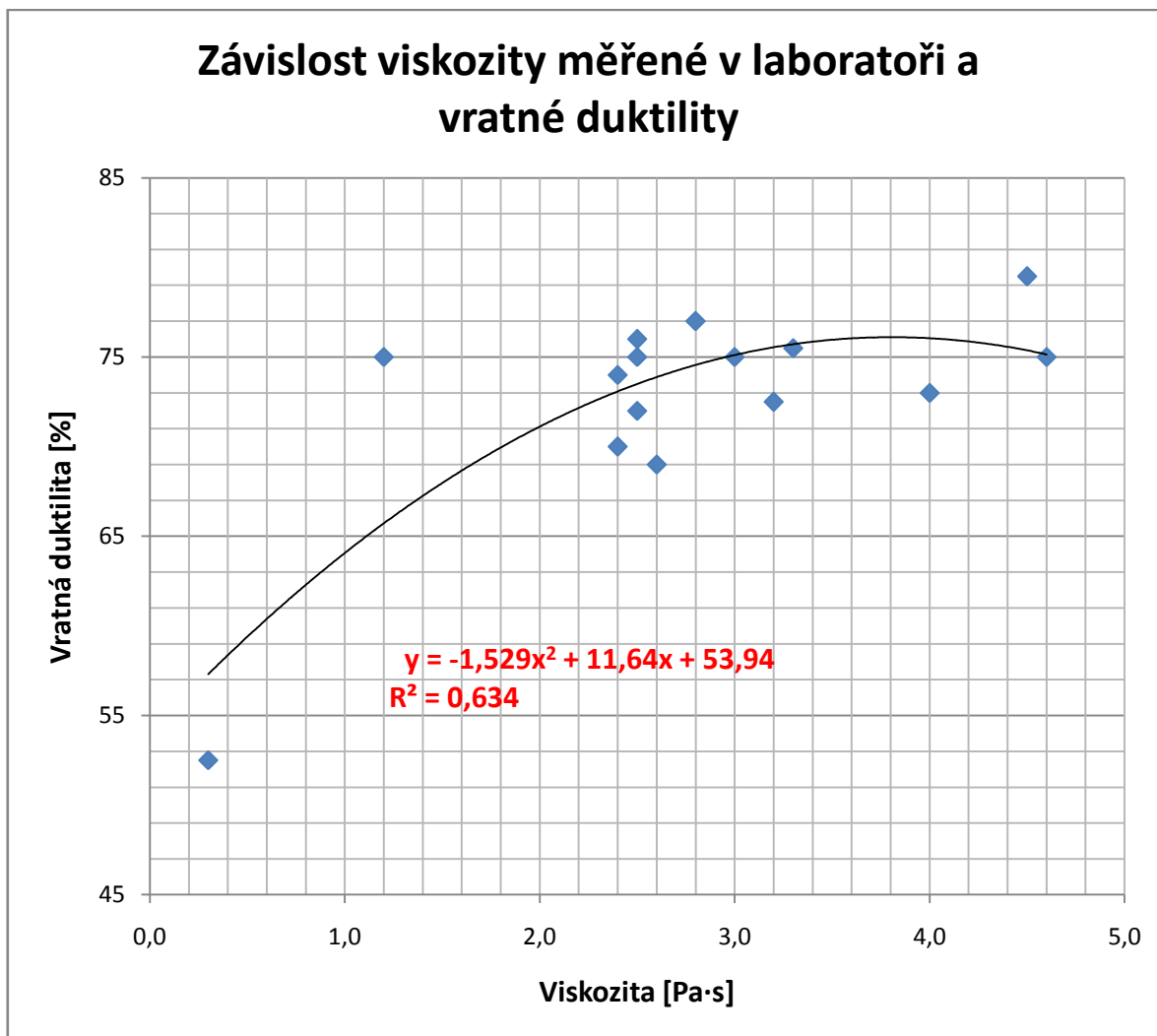
Při stanovení závislosti byla využita rovnice polynomicke regrese $y = -1,515x^2 + 12,60x + 5,027$ a jedná se o poměrně silnou závislost, což vyjadřuje korelační koeficient $R^2 = 0,762$ (graf 9).



Graf 9 Závislost viskozity a resilience

e) **Závislost viskozity měřené v laboratoři a vratné duktility**

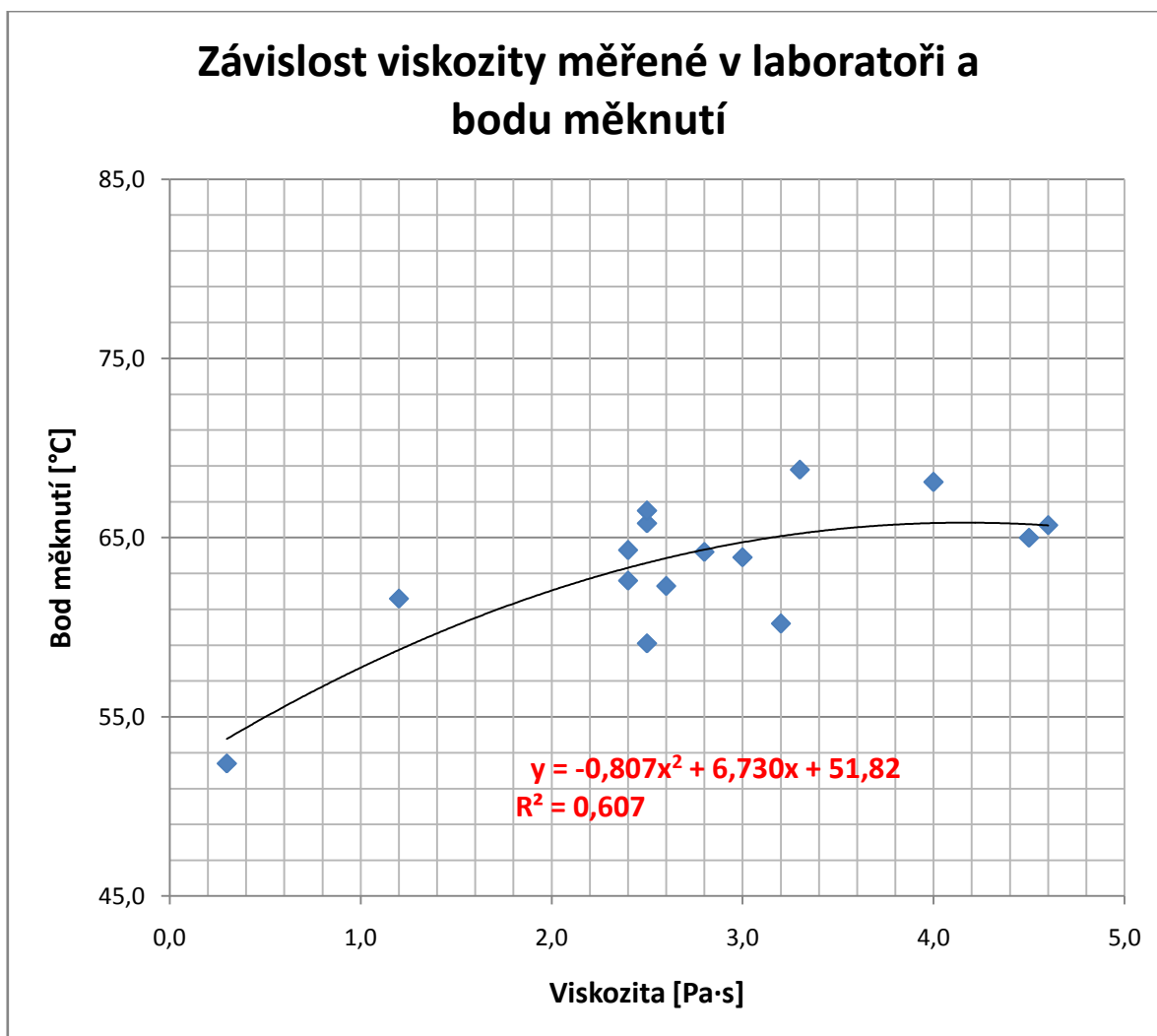
Závislost je nejlépe vystižena opět rovnicí polynomické regrese: $y = -1,529x^2 + 11,64x + 53,94$. Korelační koeficient $R^2 = 0,634$ nevykazuje nějak silnou závislost (graf 10).



Graf 10 Závislost viskozity a vratné duktility

f) Závislost viskozity měřené v laboratoři a bodu měknutí

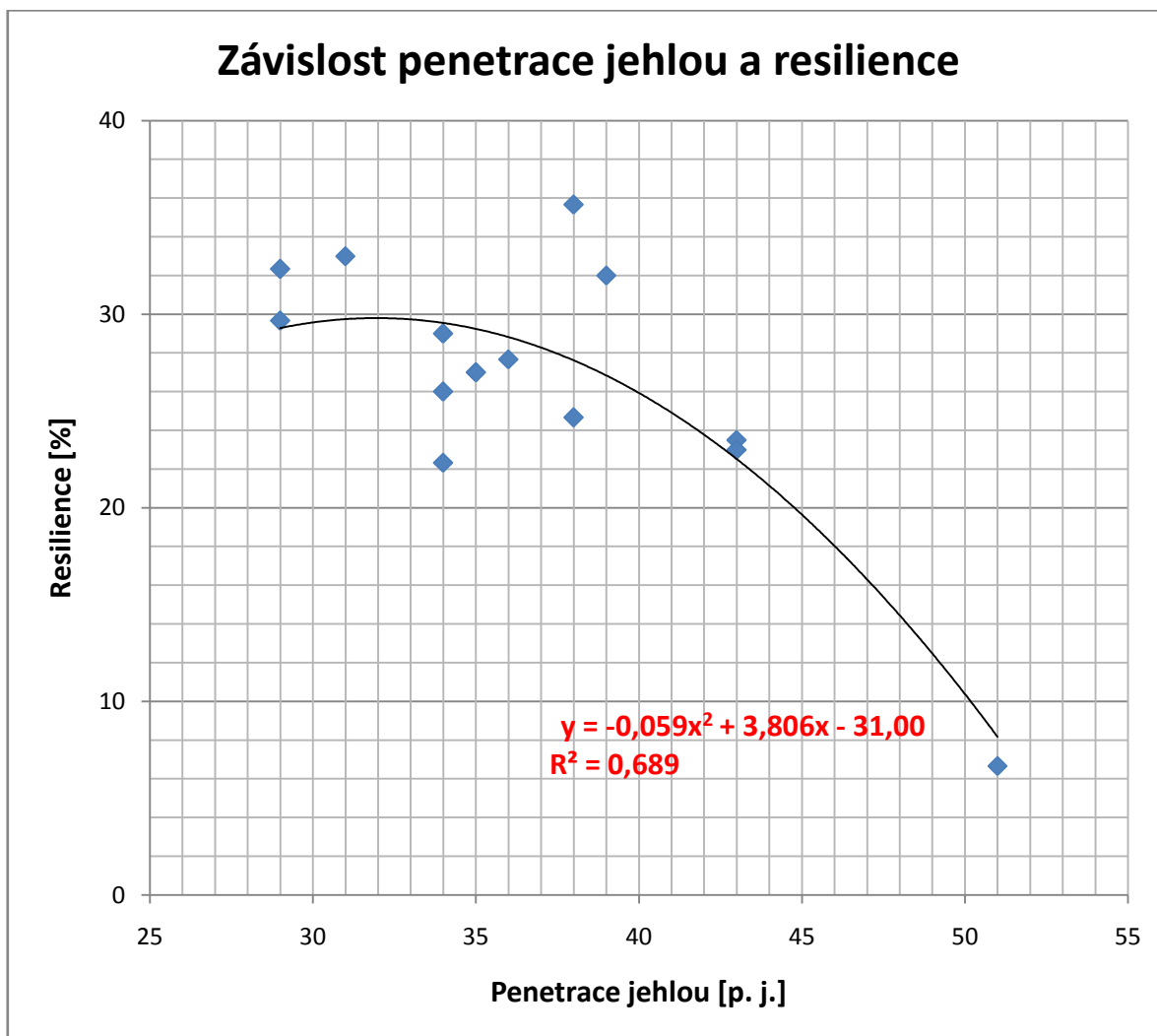
Závislost viskozity a bodu měknutí je vyjádřena rovnicí polynomicke regrese $y = -0,807x^2 + 6,730x + 51,82$. Poměrně slabou závislost vystihuje korelační koeficient $R^2 = 0,607$ (graf 11).



Graf 11 Závislost viskozity a bodu měknutí

g) Závislost penetrace jehlou a resilience

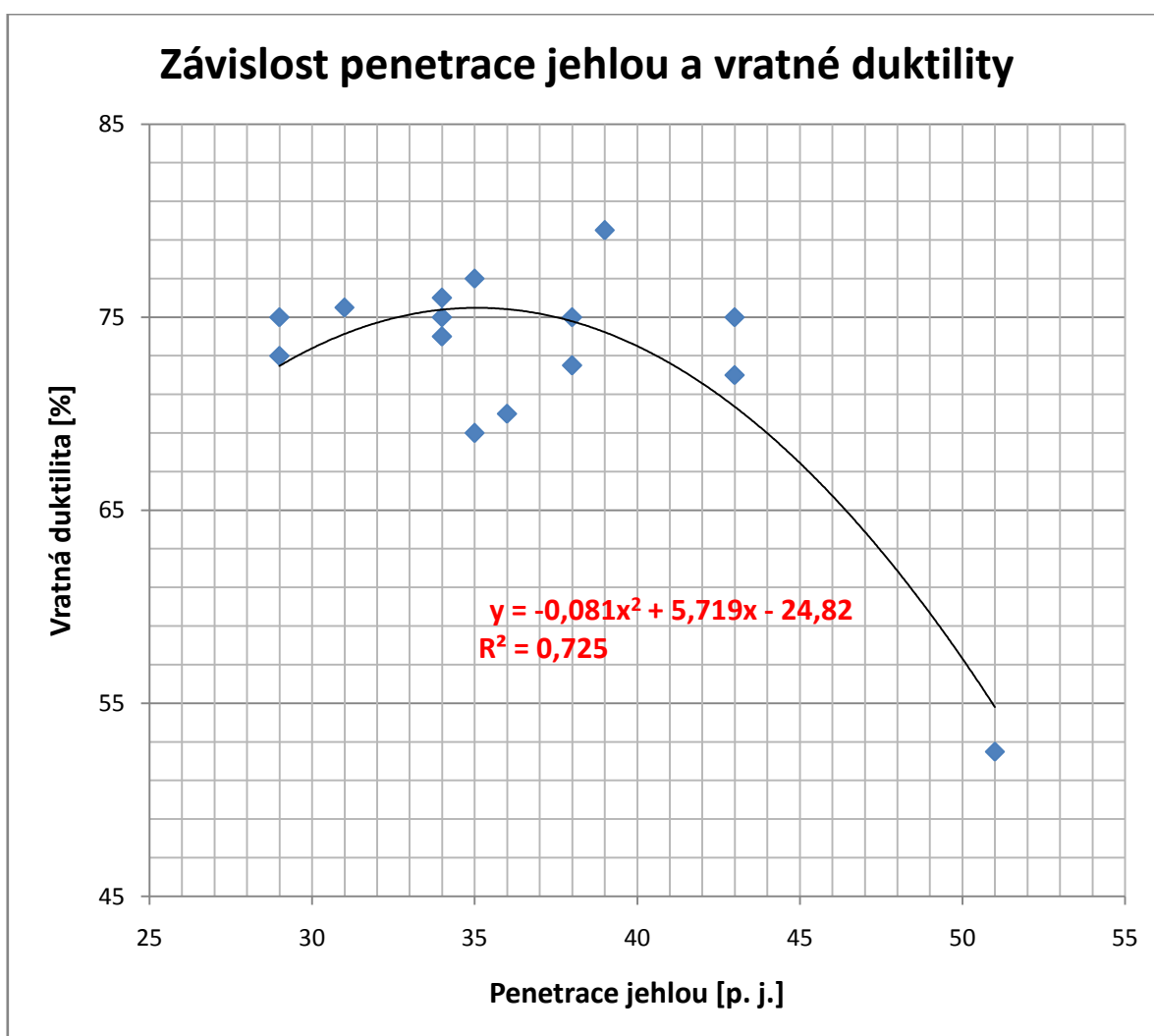
Tentokrát jsem využil proložení křivkou tvaru polynomicke funkce druhého řádu (graf 12), jejíž tvar vyjadřuje rovnice $y = -0,059x^2 + 3,806x - 31,00$. Korelační koeficient R^2 je roven 0,689 a nevyjadřuje nějak silnou závislost. Jako vstupní hodnoty penetrace jehlou byly použity hodnoty s vyloučením nejnižší naměřené hodnoty podle TP 148. [7]



Graf 12 Závislost penetrace jehlou a resilience

h) Závislost penetrace jehlou a vratné duktility

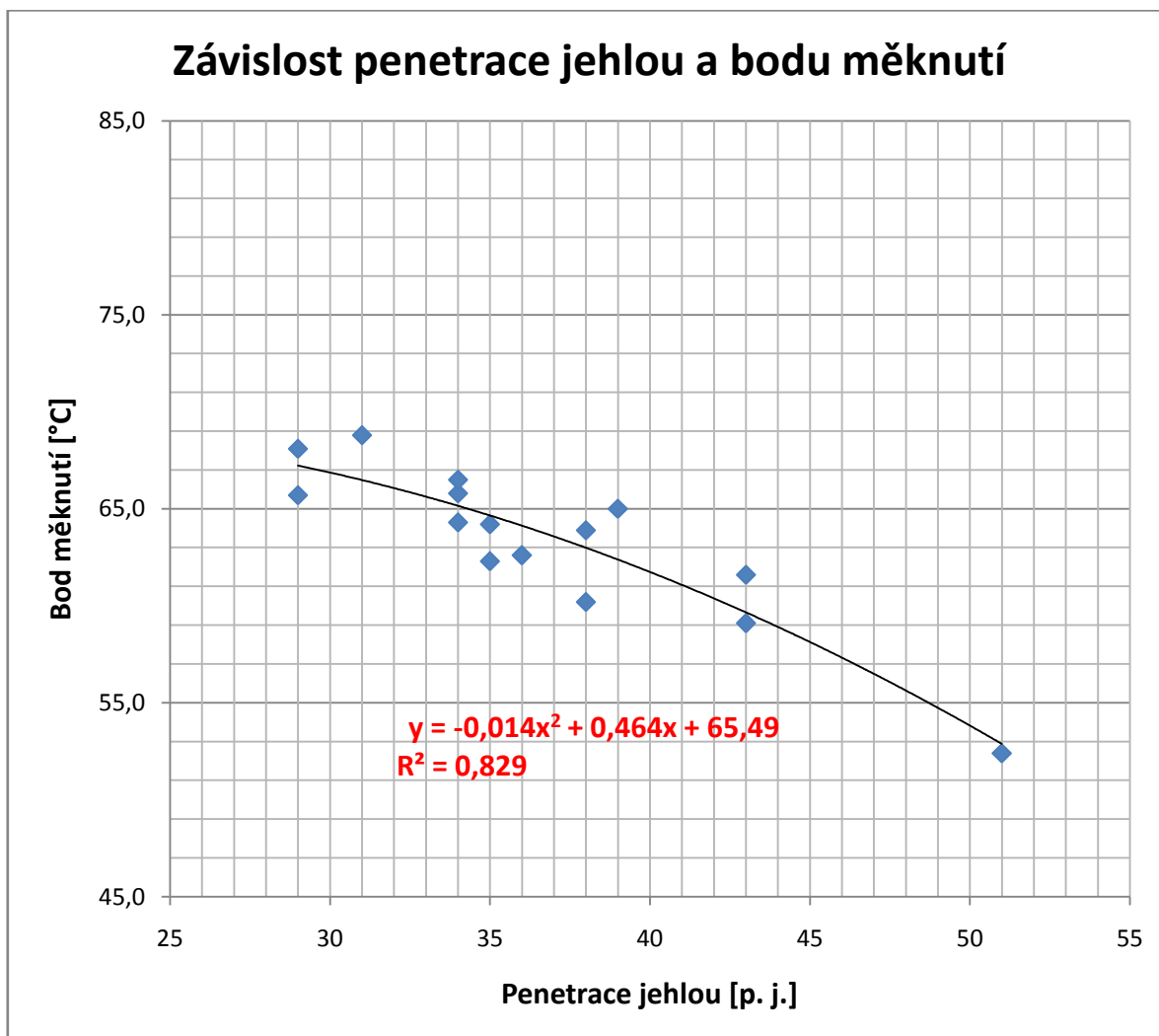
Závislost penetrace jehlou (s vyloučením nejnižší hodnoty) a vratné duktility zobrazuje polynomiická funkce druhého řádu (graf 13). Rovnice této funkce je rovna $y = -0,081x^2 + 5,719x - 24,82$. Korelační koeficient R^2 činí 0,725.



Graf 13 Závislost penetrace jehlou a vratné duktility

i) Závislost penetrace jehlou a bodu měknutí

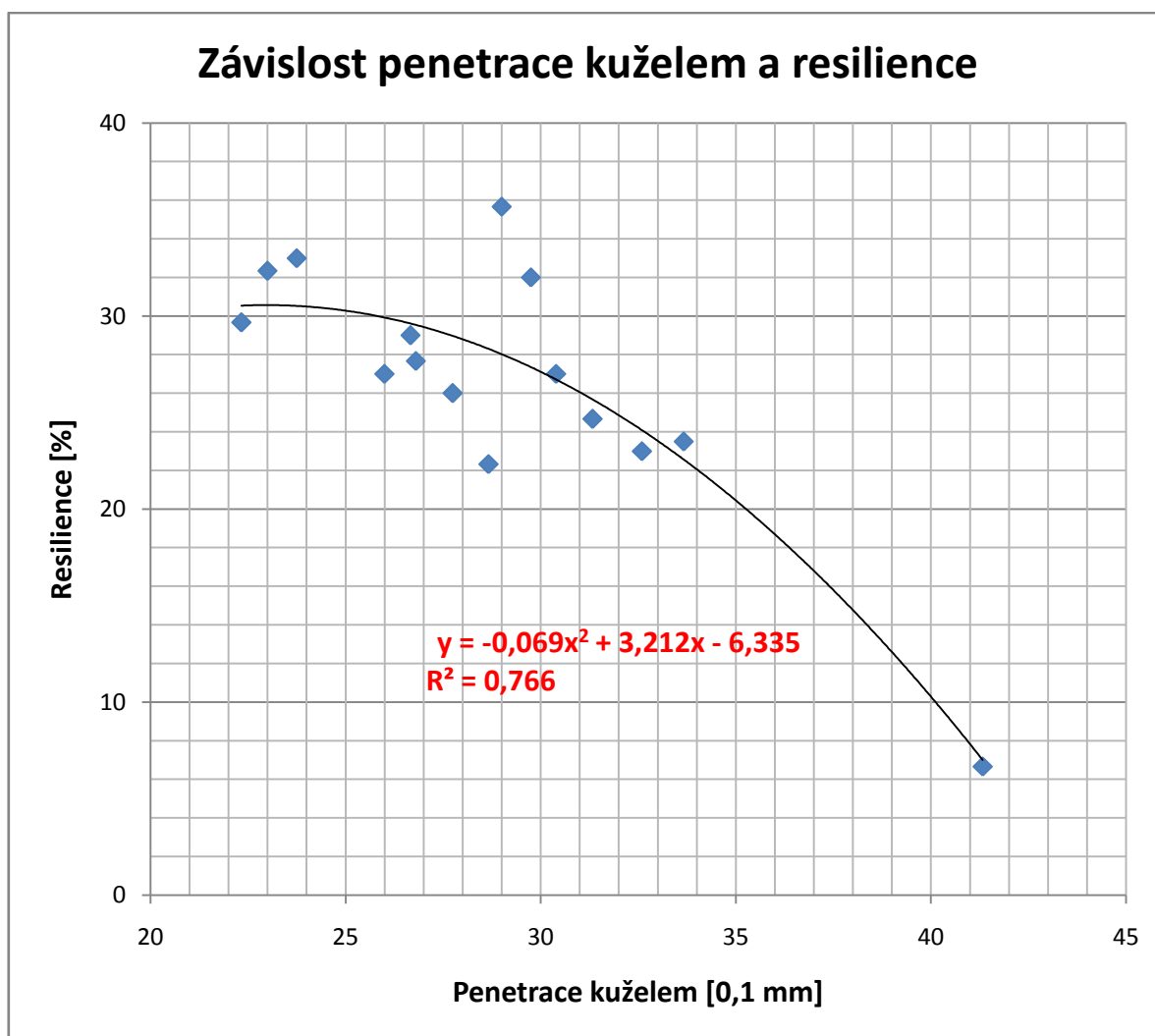
Závislost penetrace jehlou a bodu měknutí vykazuje silnou závislost (graf 14), o čemž vypovídá hodnota korelačního součinitele $R^2 = 0,829$. Rovnice proložené křivky je $y = -0,014x^2 + 0,464x + 65,49$. Do stanovení závislosti penetrace jehlou a bodu měknutí vstupují hodnoty penetrace jehlou s vyloučením nejnižší naměřené hodnoty podle TP 148. [7]



Graf 14 Závislost penetrace jehlou a bodu měknutí

j) Závislost penetrace kuželem a resilience

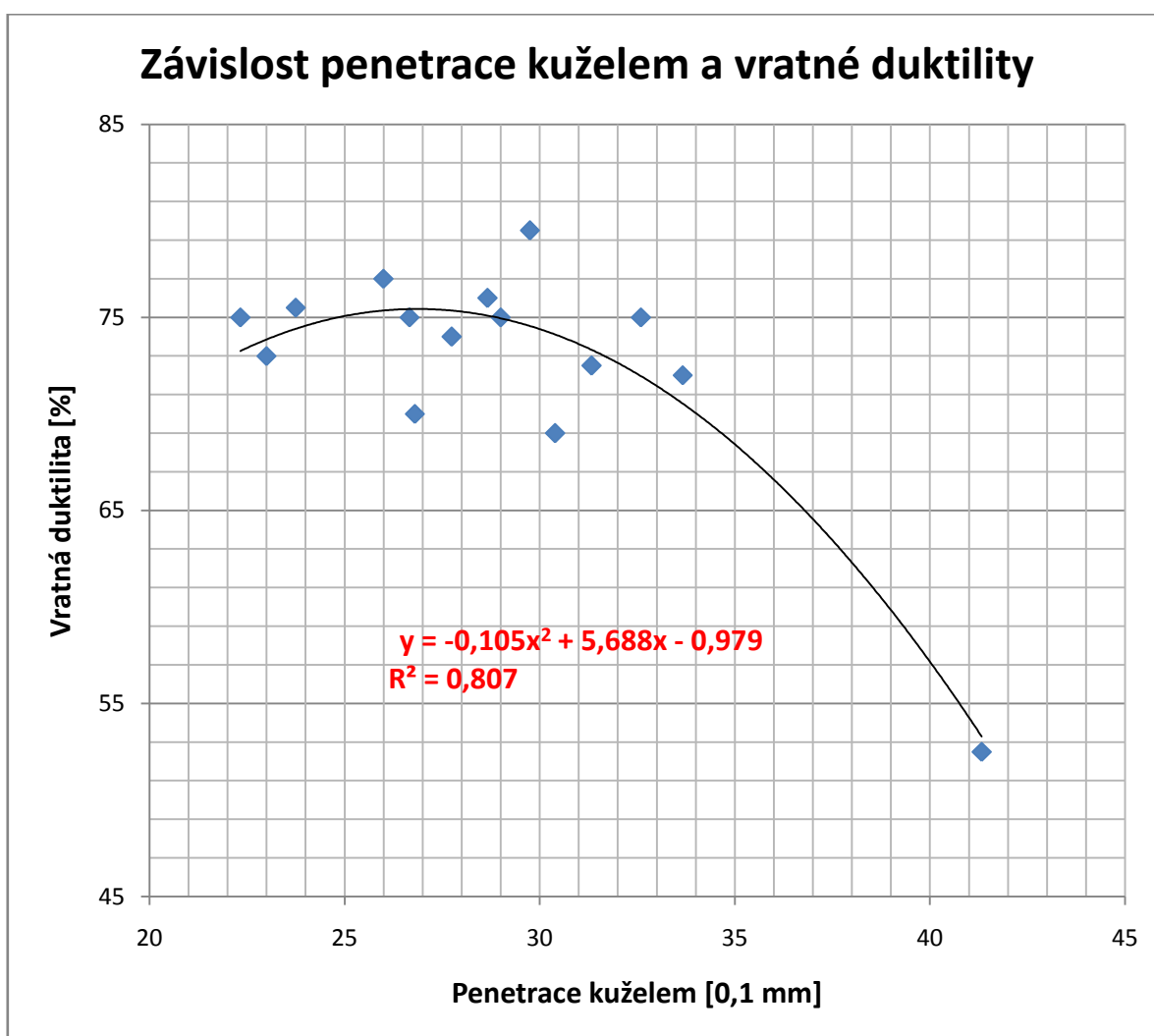
Je využito polynomické funkce druhého řádu. Rovnice této funkce vypadá následujícím způsobem: $y = -0,069x^2 + 3,212x - 6,335$, přičemž $R^2 = 0,766$ (graf 15).



Graf 15 *Závislost penetrace kuželem a resilience*

k) Závislost penetrace kuželem a vratné duktility

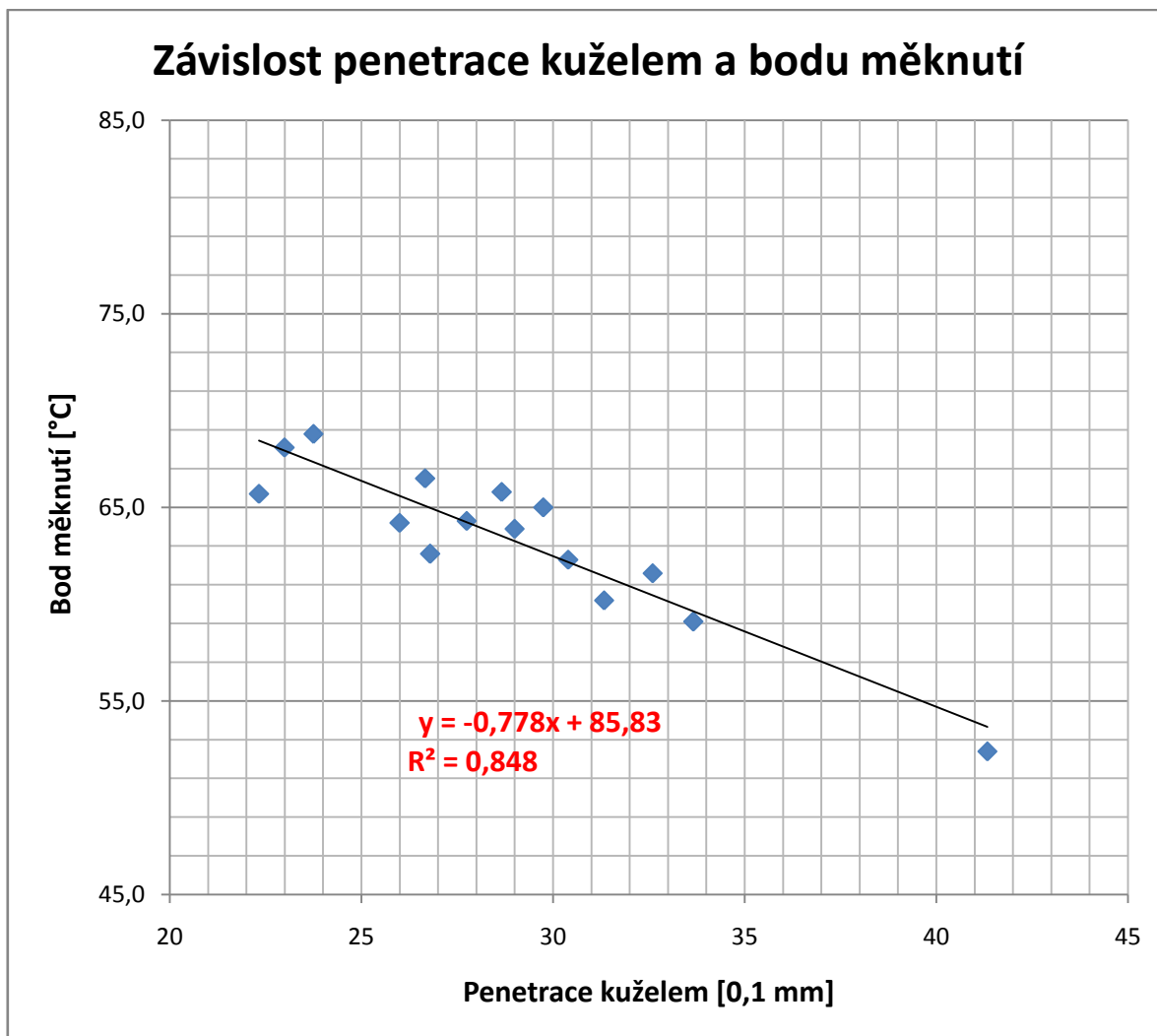
Silnou závislost vykazuje proložená křivka změřenými body zkoušek Stanovení penetrace kuželem a Stanovení vratné duktility. Hodnota korelačního koeficientu je 0,807. Křivka je definována rovnicí $y = -0,105x^2 + 5,688x - 0,979$ (graf 16).



Graf 16 Závislost penetrace kuželem a vratné duktility

l) Závislost penetrace kuželem a bodu měknutí

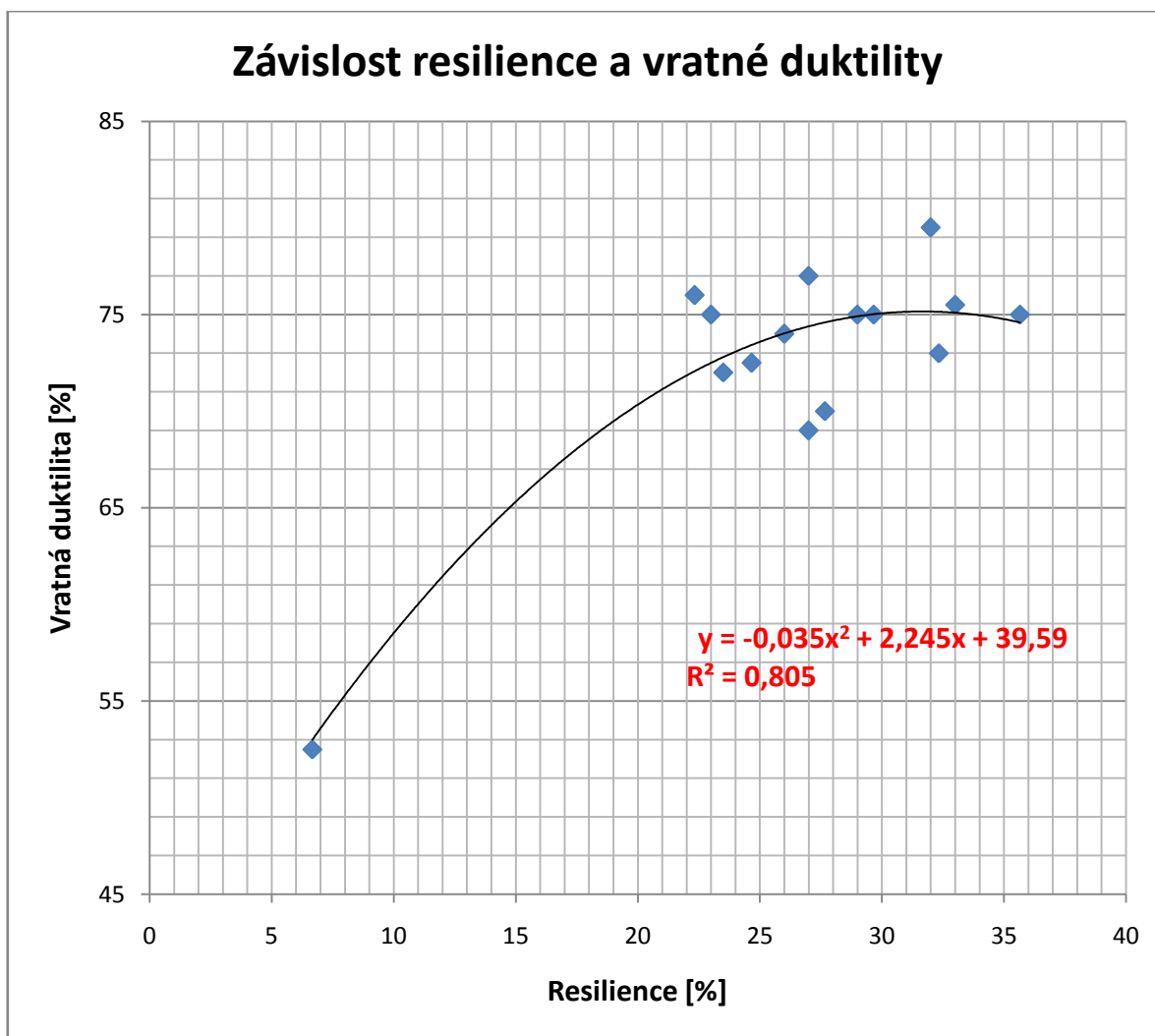
Velmi silná závislost je určena hodnotou korelačního koeficientu R^2 , která činí 0,848. Proložená křivka má lineární tvar a její rovnice je $y = -0,778x + 85,83$ (graf 17).



Graf 17 *Závislost penetrace kuželem a bodu měknutí*

m) Závislost resilience a vratné duktility

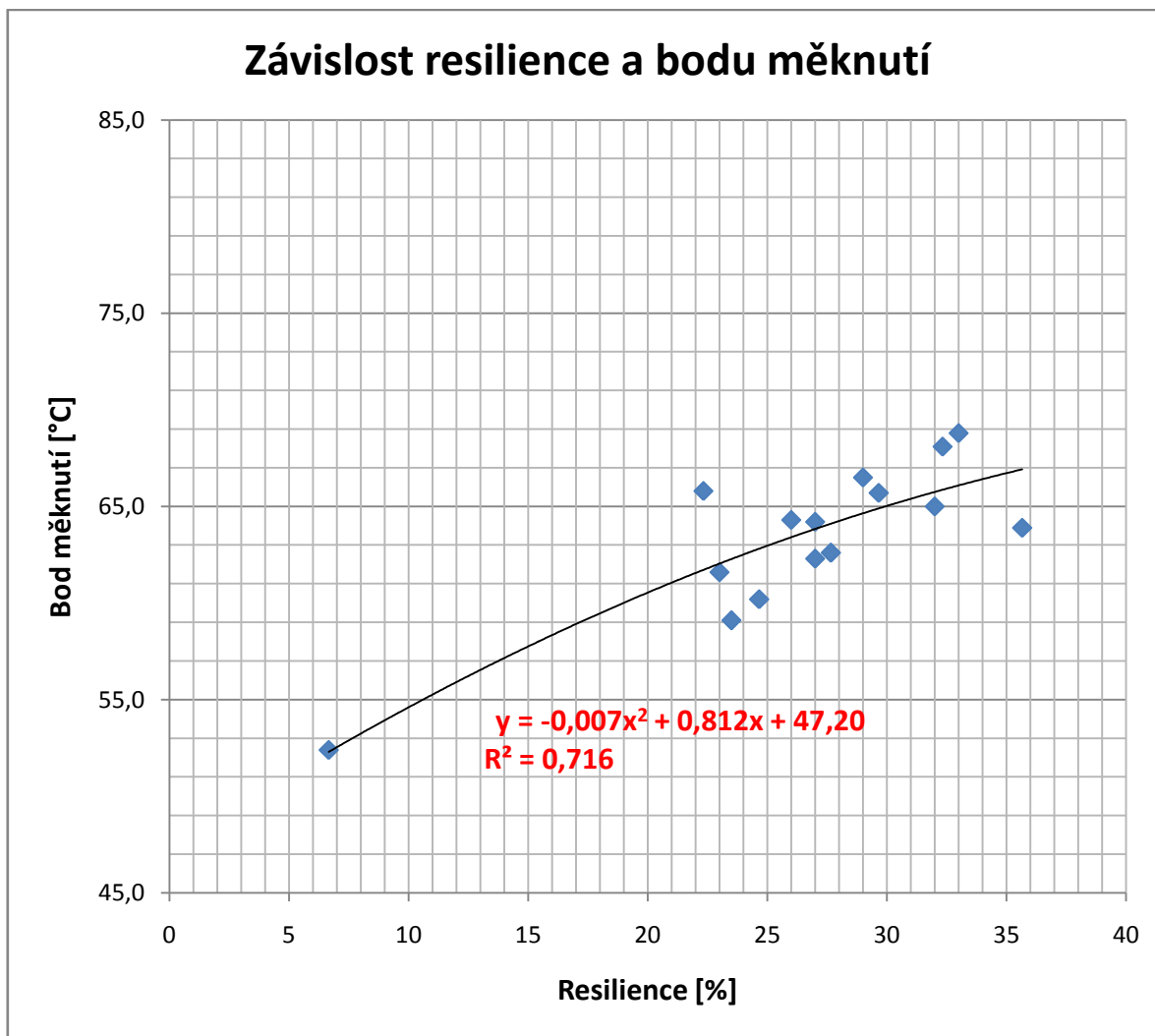
Závislost resilience a vratné duktility je dána polynomicou funkcí druhého stupně, jejíž rovnice je $y = -0,035x^2 + 2,245x + 39,59$ (graf 18). Korelační koeficient je roven 0,805 a vyhodnocuje tuto závislost jako silnou.



Graf 18 *Závislost resilience a vratné duktility*

n) Závislost resilience a bodu měknutí

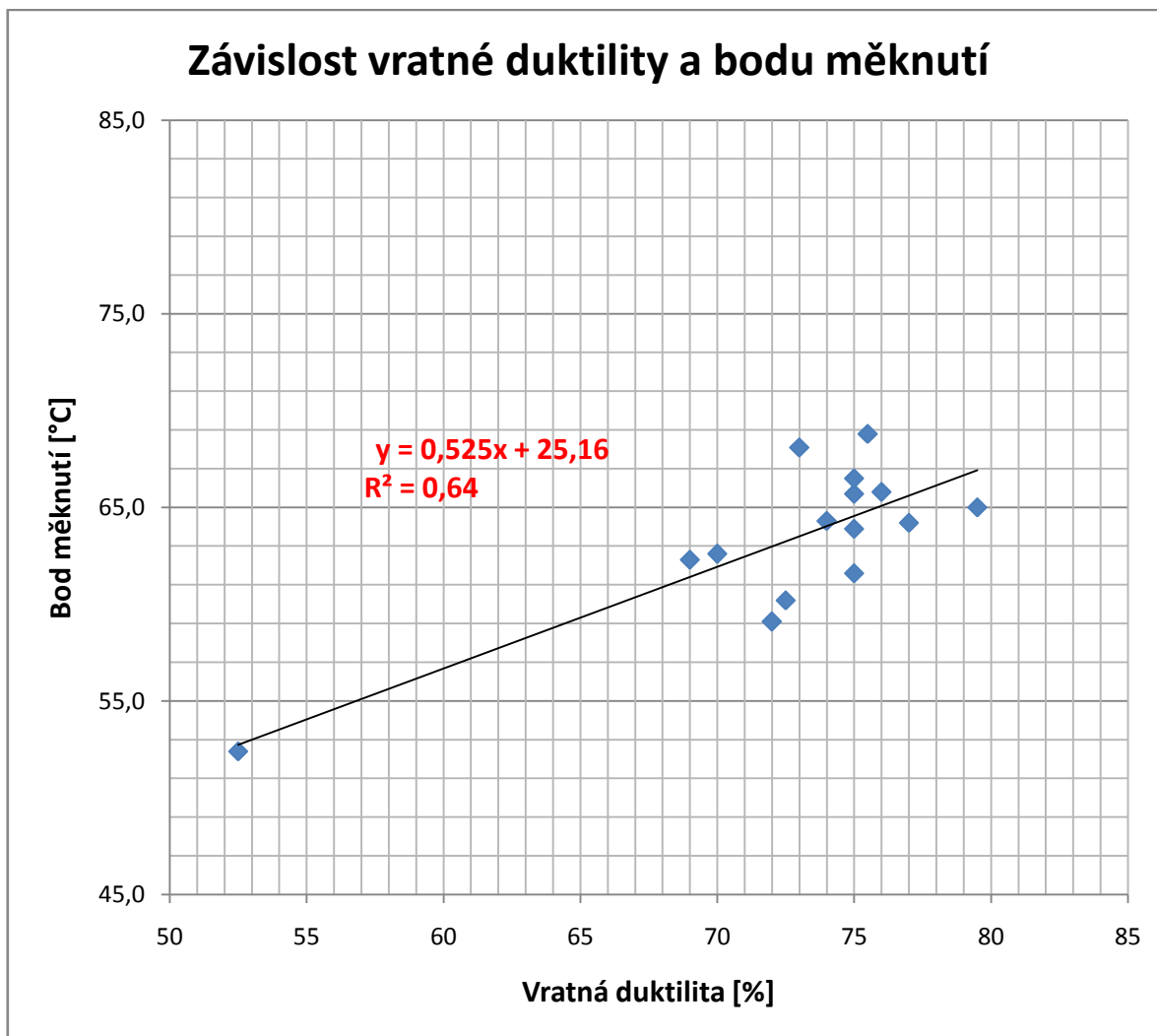
Poměrně silnou závislost vykazuje korelační koeficient R^2 . Závislost je definována rovnicí polynomické regrese $y = -0,007x^2 + 0,812x + 47,20$ (graf 19).



Graf 19 Závislost resilience a bodu měknutí

o) Závislost vratné duktility a bodu měknutí

Závislost vratné duktility a bodu měknutí je dána rovnicí lineární regrese $y = 0,525x + 25,16$ + 25,16. Hodnota korelačního koeficientu R^2 činí 0,64 (graf 20).



Graf 20 Závislost vratné duktility a bodu měknutí

6.9 Korelační koeficienty

Přehledné zobrazení závislostí všech zkoušek nejlépe vystihuje následující tabulka 9, která obsahuje hodnoty korelačních koeficientů R^2 .

Hodnoty korelačních koeficientů R^2						
	<i>Dynamická viskozita</i>	<i>Penetrace jehlou</i>	<i>Penetrace kuželem</i>	<i>Resilience</i>	<i>Vratná duktilita</i>	<i>Bod měknutí</i>
<i>Dynamická viskozita</i>	X	0,644	0,646	0,762	0,634	0,607
<i>Penetrace jehlou</i>	X	X	0,923	0,689	0,725	0,829
<i>Penetrace kuželem</i>	X	X	X	0,766	0,807	0,848
<i>Resilience</i>	X	X	X	X	0,805	0,716
<i>Vratná duktilita</i>	X	X	X	X	X	0,640
<i>Bod měknutí</i>	X	X	X	X	X	X

Tab. 9 Hodnoty korelačních koeficientů R^2 včetně vzorku 7

Pokud ovšem vyřadíme vzorek č. 7, který v jednotlivých zkouškách vykazoval odlišné vlastnosti, hodnoty R^2 se logicky znatelně sníží, což dokazuje tabulka 10.

Hodnoty korelačních koeficientů R^2						
	<i>Dynamická viskozita</i>	<i>Penetrace jehlou</i>	<i>Penetrace kuželem</i>	<i>Resilience</i>	<i>Vratná duktilita</i>	<i>Bod měknutí</i>
<i>Dynamická viskozita</i>	X	0,330	0,308	0,390	0,195	0,206
<i>Penetrace jehlou</i>	X	X	0,854	0,175	0,000	0,636
<i>Penetrace kuželem</i>	X	X	X	0,317	0,051	0,691
<i>Resilience</i>	X	X	X	X	0,105	0,366
<i>Vratná duktilita</i>	X	X	X	X	X	0,192
<i>Bod měknutí</i>	X	X	X	X	X	X

Tab. 10 Hodnoty korelačních koeficientů R^2 bez vzorku 7

7. Závěr

Cílem práce bylo určení vybraných laboratorních vlastností asfaltů modifikovaných pryžovými granuláty (CRmB), které byly odebrány při výrobě na obalovnách asfaltových směsí. Pro hodnocení laboratorních vlastností CRmB byly vybrány tyto zkoušky: dynamická viskozita, penetrace jehlou, penetrace kuželem, resilience, vratná duktilita a bod měknutí. Dále byly určeny korelace výsledků zkoušek jednotlivých pojiv.

Dynamické viskozity jednotlivých pojiv stanovené při teplotě 175 °C vřetenovým rotačním viskozimetrem typu RION se pohybovaly v rozmezí 1,2 Pa·s až 4,6 Pa·s, přičemž TP 148 [7] požadují hodnotu dynamické viskozity 1,5 Pa·s až 4,0 Pa·s. Zkouška byla provedena nejprve na obalovně při odběru vzorku a poté i kontrolně v laboratoři. Z výsledků je patrné, že se viskozita stanovená v laboratoři ve většině případů zvýšila oproti stanovení na obalovně, což je zapříčiněno doreagováním pryžového granulátu s asfaltem při nahřívání laboratorního vzorku CRmB. Požadavek TP 148 na rozsah hodnoty viskozity byl ve většině případů splněn.

Všechny CRmB splňovaly požadovaný rozsah penetrace jehlou uvedený v TP 148 ($25 \cdot 0,1$ mm až $75 \cdot 0,1$ mm). [7] Tento rozsah se zdá být příliš široký a stálo by za uvážení ho mírně zúžit, což je provedeno ve stavebně technickém osvědčení pro výrobu CRmB. [13]

Dále byly získány zkušenosti s prováděním zkoušky penetrace kuželem podle ČSN EN 13880-2 [8], která se běžně využívá pro zálivkové hmoty a v USA i pro hodnocení vlastností asfaltů modifikovaných pryžovými granuláty. Výsledné hodnoty se pohybovaly mezi $22 \cdot 0,1$ mm až $41 \cdot 0,1$ mm. Na tento parametr není v ČR pro CRmB uveden požadavek.

Elastomerní vlastnosti CRmB se běžně hodnotí zkouškou resilience, přičemž TP 148 požadují minimální hodnotu resilience 20 %. [7] Až na jedno pojivo všechny CRmB tento požadavek splnila. Nízká hodnota resilience vzorku č. 7 je pravděpodobně způsobena velice nízkým obsahem pryžového granulátu v CRmB. Vzorek byl totiž odebrán po výrobě asfaltových směsí s CRmB za nestandardních podmínek a obalovna nebyla vybavena odběrným místem pojiva v místě váhy pojiva.

Další možností stanovení míry pružnosti pojiv je použití zkoušky vratné duktility. Tato zkouška potvrdila výsledky resilience, kdy nejnižší hodnotu vratné duktility vykázal vzorek č. 7 (53 %), ostatní pojiva vykázala vratnou duktilitu v rozmezí 69 % až 80 %.

Většina poživ splnila minimální požadovanou hodnotu bodu měknutí nechválených TP 148 (55 °C pro nízkoviskózní CRmB i 60 °C pro vysokoviskózní CRmB), dosud platných TP 148 (55 °C pro obě skupiny) a STO (60 °C pro vysokoviskózní CRmB) [7] [12] [14]. Informace z STO je nejbližší k naměřeným skutečnostem.

Výsledky jednotlivých zkoušek CRmB prokázaly převážně silnou vzájemnou korelaci (R^2 v rozmezí 0,607 až 0,923), hlavně u výsledků empirických zkoušek za podobných teplot. Pokud se ovšem z matice vyřadily výsledky vzorku č. 7, který vykazoval velice odlišné vlastnosti od ostatních CRmB, hodnoty R^2 se logicky znatelně snížily (0,000 až 0,854). Je to z toho důvodu, že vyrobené CRmB vykazují velice podobné vlastnosti v rámci požadavků TP 148.

Hlavním cílem zadání bakalářské práce bylo stanovení vzájemné závislosti zkoušek penetrace jehlou a penetrace kuželem. Penetrace jehlou má nevýhodu zkreslení výsledků v případě zapíchnutí jehly do větší částice pryžového granulátu. Takový výsledek se podle TP 148 vylučuje ze stanovení průměrné hodnoty penetrace. Proto jsem vypočítal rozptyl u každého vzorku a to jak u penetrace jehlou všech naměřených hodnot, tak s vyloučením nejnižší naměřené hodnoty podle TP 148. [7] Z jednotlivých rozptylů hodnot pro tyto dvě skupiny jsem vypočítal průměrnou hodnotu. Průměrná hodnota u penetrace jehlou se všemi naměřenými hodnotami činila 3,35417. Pokud jsem ovšem vyloučil nejmenší naměřené hodnoty, tato průměrná hodnota klesla na hodnotu 1,97037. Stejným způsobem jsem vypočítal průměrnou hodnotu u penetrace kuželem, která klesla na pouhých 0,88889.

Podle výsledků stanovených v bakalářské práci mohu doporučit zkoušení penetrace CRmB pomocí kužele, které vykazuje nejmenší rozptyl hodnot. Tato zkouška se používá pro zálivky a zálivky obvykle obsahují také pryžový granulát. Toho si je vědoma soustava požadavků na CRmB v USA, kde se tato zkouška požaduje i pro CRmB. Do předpisů ČR se zkoušce penetrace jehlou dala přednost jen z důvodu umožnit všem laboratořím CRmB zkoušet. Na zkoušku penetrace kuželem nejsou vybaveny všechny silniční laboratoře.

8. Seznam použité literatury

- [1] <https://www.petroleum.cz/vyroby/asfalty-silnicni.aspx>
- [2] <https://www.gasfalt.cz/index.php/cz/>
- [3] Tisková zpráva: *Gumoasfatové směsi zlepší kvalitu českých vozovek*, 2007 [cit. 30.4.2014]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/tiskove-zpravy-f19527/gumoasfaltove-smesi-zlepsí-kvalitu-ceskych-vozovek-d40392>
- [4] Kachtík, J., Kudrna, J., Dašek, O. *Zkušenosti s výrobou asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem v ČR*. Konference asfaltové vozovky 2013, 2013. ISBN 978-80-903925-3-3.
- [5] ČSN EN 13302 *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení dynamické viskozity asfaltových pojiv rotačním vřetenovým viskozimetrem*. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [6] ČSN EN 1426 *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [7] TP 148 *Hutněné asfaltové vrstvy s pojivem modifikovaným pryžovým granulátem z pneumatik*. Brno: VUT FAST, 2009.
- [8] ČSN EN 13880-2 *Zálivky za horka – Část 2: Zkušební metoda pro stanovení penetrace kuželem při 25 °C*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [9] ČSN EN 13880-3 *Zálivky za horka – Část 3: Zkušební metoda pro stanovení penetrace a pružné regenerace (resilience)*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [10] ČSN EN 13398 *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení vratné duktility modifikovaných asfaltů*. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [11] ČSN EN 1427 *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [12] TP 148 *Hutněné asfaltové vrstvy s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem*. Brno: VUT FAST, 2011.
- [13] TePř 1 *Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem z pneumatik*. Brno: G ASFALT s.r.o., 2012.
- [14] Certifikát systému řízení výroby č. 12 0360 SV/AO, G ASFALT s.r.o., 2012.

Seznam tabulek

Tab. 1	<i>Zkoušené vzorky s naměřenými viskozitami</i>	13
Tab. 2	<i>Požadavky – platné TP 148 [7]</i>	22
Tab. 3	<i>Požadavky – neschválené TP 148 [12].....</i>	23
Tab. 4	<i>Výsledky dynamické viskozity porovnané s TP 148.....</i>	24
Tab. 5	<i>Naměřené hodnoty – penetrace jehlou</i>	25
Tab. 6	<i>Naměřené hodnoty – penetrace kuželem</i>	27
Tab. 7	<i>Naměřené hodnoty – resilience</i>	29
Tab. 8	<i>Splnění požadavků TP 148</i>	33
Tab. 9	<i>Hodnoty korelačních koeficientů R^2 včetně vzorku 7</i>	49
Tab. 10	<i>Hodnoty korelačních koeficientů R^2 včetně vzorku 7</i>	50

Seznam grafů

Graf 1	<i>Stanovení penetrace jehlou</i>	26
Graf 2	<i>Stanovení penetrace kuželem</i>	28
Graf 3	<i>Stanovení resilience</i>	30
Graf 4	<i>Stanovení vratné duktility.....</i>	31
Graf 5	<i>Stanovení bodu měknutí</i>	32
Graf 6	<i>Závislost zkoušky penetrace jehlou a penetrace kuželem</i>	34
Graf 7	<i>Závislost viskozity a penetrace jehlou</i>	35
Graf 8	<i>Závislost viskozity a penetrace kuželem</i>	36
Graf 9	<i>Závislost viskozity a resilience</i>	37
Graf 10	<i>Závislost viskozity a vratné duktility</i>	38
Graf 11	<i>Závislost viskozity a bodu měknutí</i>	39
Graf 12	<i>Závislost penetrace jehlou a resilience</i>	40
Graf 13	<i>Závislost penetrace jehlou a vratné duktility</i>	41
Graf 14	<i>Závislost penetrace jehlou a bodu měknutí</i>	42
Graf 15	<i>Závislost penetrace kuželem a resilience</i>	43
Graf 16	<i>Závislost penetrace kuželem a vratné duktility</i>	44
Graf 17	<i>Závislost penetrace kuželem a bodu měknutí</i>	45
Graf 18	<i>Závislost resilience a vratné duktility</i>	46
Graf 19	<i>Závislost resilience a bodu měknutí</i>	47
Graf 20	<i>Závislost vratné duktility a bodu měknutí</i>	48

Seznam obrázků

Obr. 1	<i>Mísicí zařízení připojené na obalovnu</i>	10
Obr. 2	<i>Digitální rotační vřetenový viskozimetr typu RION</i>	15
Obr. 3	<i>Měření dynamické viskozity</i>	15
Obr. 4	<i>Vzorkování – penetrace jehlou</i>	16
Obr. 5	<i>Penetrometr – penetrace jehlou</i>	16
Obr. 6	<i>Detail – penetrace kuželem</i>	17
Obr. 7	<i>Penetrometr – penetrace kuželem</i>	17
Obr. 8	<i>Penetrometr – resilience</i>	18
Obr. 9	<i>Detail – resilience</i>	18
Obr. 10	<i>Výsledné otisky</i>	18
Obr. 11	<i>Vzorkování – vratná duktilita</i>	19
Obr. 12	<i>Usazení vzorku do protahovacího zařízení</i>	19
Obr. 13	<i>Protahování vzorků 200 mm</i>	20
Obr. 14	<i>Konečná vzdálenost polovláken</i>	20
Obr. 15	<i>Automatické zařízení – bod měknutí</i>	21
Obr. 16	<i>Vzorkování – bod měknutí</i>	21
Obr. 17	<i>Detail – bod měknutí</i>	21