

Korelace SHT a NCTL testů pro geomembrány

Kristýna Hejduková

Bakalářská práce
2019

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav inženýrství polymerů

akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Kristýna Hejduková**
Osobní číslo: **T16371**
Studijní program: **B2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Polymerní materiály a technologie**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Korelace SHT a NCTL testů pro geomembrány**

Zásady pro vypracování:

Cílem teoretické části bakalářské práce je připravit literární rešerši obsahující: Stručný popis technologie výroby geomembrán v JUTA a.s. Vymezení pojmu životnosti geomembrán a způsoby jejich posouzení (vývoj metod). Detailní popis metody NCTL a SHT. Dosud publikované výsledky NCTL vs. SHT na geomembránách. V praktické části bakalářské práce budou zhodnoceny výsledky experimentálních prací realizovaných metodami SHT vs NCTL jak na granulátech, tak na hotových výrobcích (geomembránách) na pracovištích JUTA a.s., UNIPETROL RPA – odštěpný závod PIB a ÚMCH AV ČR Praha.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. A. C. Albertsson. Long-Term Properties of Polyolefins, *Advances in Polymer Science* Vol. 169, Springer – Verlag, Berlin, Germany, 2004. ISBN: 978-3-540-45196-9

2. W. Grellmann, B. Langer. Deformation and Fracture behaviour of polymer materials, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2017, ISBN: 978-3-319-41877-3 (hard copy), 978-3-319-41879-7 (epub).

3. W. Grellmann, S. Seidler. Deformation and fracture of polymers, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 200, ISBN: 978-3-642-07453-0 (hard copy), 978-3-662-04556-5 (epub).

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Alena Kalendová, Ph.D.**

Ústav inženýrství polymerů

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **17. května 2019**

Ve Zlíně dne 25. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Tomáš Sedláček, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: HEJDUKOVÁ KRISTÝNA

Obor: PMT

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 17.5.2019

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na životnost geomembrán a vstupních materiálů, z nichž jsou vyrobeny a také na metody posuzování životnosti, které se stanovují pomocí urychlených testů Full notch creep test – FNCT (ISO 16770) a Notch constant tensile load test – NCTL (ASTM D 5397-99, ČSN EN 14576). Pro některé materiály je však délka testu příliš dlouhá (až 1 rok). Z těchto důvodů se hledají rychlejší řešení. Novou možnost nabízí metoda měření Strain hardening testu – SHT (ČSN ISO 18488). Bakalářská práce vznikla ve spolupráci s firmou Juta a.s.

Klíčová slova: geomembrány, polyethylen, životnost, FNCT, NCTL, SHT.

ABSTRACT

The bachelor thesis is focused on the life-time of geomembranes and input materials from which they are made and also on the methods of life assessment, which are determined by accelerated tests Full notch creep test - FNCT (ISO 16770) and Notch constant tensile load test – NCTL (ASTM D 5397-99, ČSN EN 14576). However, for some materials the test duration is too long (up to 1 year). For these reasons, faster solution are being sought. A new option is the Strain hardening test – SHT (ČSN ISO 18488). The bachelor thesis was created in cooperation with Juta a.s.

Keywords: Geomembranes, Polyethylen, Life-Time, FNCT, NCTL, SHT

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucí mé práce Ing. Aleně Kalendové Ph.D. za pomoc a trpělivost, konzultantům ve firmě Juta a.s., Doc. Ing. Evě Nezbedové, CSc. za odbornou pomoc, cenné rady a čas, který mi při realizaci bakalářské práce věnovala a Ing. Lukáši Farskému za spolupráci a poskytnuté rady. Dále bych chtěla poděkovat rodině za podporu při studiu.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 JUTA A.S.	12
1.1 HISTORIE FIRMY JUTA A.S.	12
1.2 JUTA A.S. DNES	12
1.3 GEOMEMBRÁNY	13
1.3.1 Geomembrány Junifol	13
1.3.2 Výroba geomembrán Junifol	14
2 ROZDĚLENÍ PLASTŮ	18
2.1 POLYETHYLEN (PE)	18
2.2 VYSOKO-HUSTOTNÍ POLYETHYLEN (HDPE)	19
2.2.1 Vlastnosti HDPE	19
2.2.2 Výroba HDPE	19
2.2.3 Použití HDPE	20
2.3 LINEÁRNÍ NÍZKO-HUSTOTNÍ POLYETHYLEN (LLDPE)	20
3 PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ ŽIVOTNOST GEOMEMBRÁN Z POLYETHYLENU	21
4 MEZNÍ STAVY MATERIÁLŮ GEOMEMBRÁN	24
4.1 KŘEHKÝ LOM PO DLOUHODOBÉM NAMÁHÁNÍ	24
4.1.1 Mechanismus pomalého šíření trhliny	25
4.2 RYCHLÉ ŠÍŘENÍ TRHLINY	27
5 VÝVOJ METOD	28
5.1 PENNSYLVANIA EDGE NOTCHED TEST (PENT)	28
5.2 FULL-NOTCH CREEP TEST (FNCT).....	29
5.3 NOTCHED CONSTANT TENSILE LOAD TEST (NCTL).....	31
5.3.1 Příprava zkušebních těles	31
5.3.2 Zkušební postup	32
5.3.3 Single point notch constant tensile load test (SP-NCTL)	33
5.4 STRAIN HARDENING TEST (SHT)	33
5.4.1 Příprava zkušebních těles	34
5.4.2 Zkušební postup	34
6 KORELACE SHT A NCTL PRO GEOMEMBRÁNY	36
II PRAKTICKÁ ČÁST	39
7 POPIS EXPERIMENTU	40
7.1 POUŽITÉ MATERIÁLY	40
7.2 STANOVENÍ FNCT	40
7.2.1 Příprava a popis zkušebních těles	40
7.2.2 Použitá zařízení a podmínky zkoušky	41
7.2.3 Diskuze.....	42
7.3 STANOVENÍ NCTL	42
7.3.1 Příprava a popis zkušebních těles	42

7.3.2	Použitá zařízení	44
7.3.3	Podmínky zkoušky a nastavení přístroje	44
7.3.4	Výsledek zkoušky	45
7.3.5	Diskuze.....	45
7.4	STANOVENÍ MODULU DEFORMAČNÍHO ZPEVNĚNÍ <Gp>	45
7.4.1	Příprava a popis zkušebních těles	45
7.4.2	Použitá zařízení	46
7.4.3	Podmínky zkoušky a nastavení přístroje.....	46
7.4.4	Výsledek zkoušky	47
7.4.5	Diskuze.....	47
7.5	POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH METOD	47
ZÁVĚR		48
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		50
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		54
SEZNAM OBRÁZKŮ		56
SEZNAM TABULEK.....		58
SEZNAM PŘÍLOH.....		59

ÚVOD

Vysoko-hustotní polyethylen (HDPE) je jedním z hlavních termoplastických materiálů, které se používají na výrobu geomembrán. Životnost geomembrán je limitována dvěma mezními stavy. Jedná se o pomalé šíření trhliny (slow crack rapid – SCG) a rychlé šíření trhliny (rapid crack propagation – RPC). Pozornost je v této práci věnována SCG, který vzniká po dlouhodobém namáhání za normálních podmínek, tzn. při zatíženích ležících pod mezí kluzu daného materiálu a teplotě blízké normální teplotě. Jedná se o porušení lokální doprovázené malou makroskopickou deformací, nicméně ani mikroskopická deformace není zanedbatelná. Důležitou rolu při tomto porušení materiálu hraje rolu iniciace trhliny a její rychlost šíření. Primárně závisí životnost PE geomembrán na distribuci molekulových hmotností a typu použitých komonomerů.

V současné době existují standardy, které umožňují posoudit odolnost jak nativního materiálu (granulátu), tak i geomembrán proti křehkému lomu po dlouhém provozu (SCG). Konkrétně se jedná o metody Full notch creep test – FNCT (ISO 16770) a Notch constant load test - NCTL (ASTM D 5397-99, ČSN EN 14576). Tyto testy využívají lomové mechaniky, prostřednictvím které je možné stanovit relevantní parametry pro posouzení životnosti v relativně krátké době, při zachování procesu porušování, který je pozorován po dlouhé době provozu. Urychlení spočívá ve volbě vhodné geometrie zkušebního tělesa, zavedením ostrého vrubu do zkušebního tělesa a volbě vhodných zkušebních podmínek (napětí, teplota, prostředí). Tohoto urychlení je ale možné docílit pouze pro unimodální materiály, u nichž je časová náročnost testování výrazně nižší než pro bimodální materiály, u kterých se doba testování pohybuje v řádech tisíců hodin. Z toho důvodu se zavádí nové testy. Jedním z nich je metoda SHT (ČSN ISO 18488), u níž byla prokázána korelace modulu deformačního zpevnění s časem do lomu u standardně používaných metod stanovení životnosti (NCTL, FNCT).

Cílem předložené bakalářské práce bylo vypracovat literární rešerši, v níž jsem se zaměřila na vymezení pojmu životnosti geomembrán se zaměřením na pomalé šíření trhliny (SCG), dále jsem pak popsala metody pro posouzení životnosti unimodálních typů polyethylenu a analyzovala nový SHT test pro posuzování životnosti HDPE nové generace.

Cílem praktické části bakalářské práce bylo zhodnotit výsledky stanovení životnosti jak nativních materiálů, tak geomembrán získané metodami SHT a NCTL ve spolupráci s Jutou a.s., UNIPETROLEM RPA a ÚMCH AV ČR Praha.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 JUTA A.S.

Přední česká firma Juta a.s. je výrobce širokého sortimentu produktů pro stavebnictví, zemědělství, obalových materiálů a materiálů pro technické účely. [1]

Přestože původně firma proslula výrobou pytlů z přírodního materiálu juta, odkud také nese svůj název, v dnešní době se soustředí na zpracování plastů. Juta a.s. je výrobcem polyethylenových a polypropylenových tkanin, velkoobjemových vaků, netkaných textilií, podstřešních a hydroizolačních folií a rašlových pytlů. [2]. Společnost má dnes 16 výrobních závodů, z nichž většina je situována v Královéhradeckém kraji. Ředitelství firmy sídlí ve Dvoře Králové nad Labem.

1.1 Historie firmy Juta a.s.

Historie firmy Juta a.s. se píše od poloviny 19. století, kdy existovaly továrny v soukromém vlastnictví, které se zabývaly především výrobou tkanin, pytlů, motouzů, lan a přízí, a to převážně z přírodních materiálů juty a lnu. V roce 1920 byla členskými firmami založena společnost JUTA, spol. s.r.o., Praha s cílem společného nákupu vstupních surovin, centrální cenové politiky a v neposlední řadě i konkurenceschopnosti. V roce 1948 byla firma znárodněna, a byl tak založen národní podnik se sídlem v Praze, k němuž bylo postupem času připojeno více než 34 závodů. V roce 1949 byl název změněn na název „JUTA, národní podnik, Dvůr Králové nad Labem“ a sídlo firmy bylo přestěhováno právě do Dvora Králové nad Labem. Dnešní akciová společnost vznikla ze státního podniku privatizací a do obchodního rejstříku byla zapsána dne 1. 5. 1992. [3]

1.2 Juta a.s. dnes

Juta a.s. je situována ve východních Čechách se sídlem ve Dvoře Králové nad Labem. Společnost čítá 16 závodů, přičemž tři se nacházejí přímo v tomto městě a další tři v jeho nejbližším okolo (Dvůr Králové nad Labem – Žireč). V čele firmy stojí generální ředitel a majitel Ing. Jiří Hlavatý, který zastává tuto funkci již od roku 1989. Dnes firma patří k předním zaměstnavatelům regionu, protože zaměstnává více než 2000 zaměstnanců. Firma se značnou měrou podílí na celkovém exportu českého průmyslu. [1]



Obr. 1: Rozmístění závodů Juta a.s. v České republice

1.3 Geomembrány

V oblasti stavebního inženýrství jsou membrány používané v kontaktu s půdou nebo v půdě a obecně jsou známé jako „geosyntetika“. Tento pojem zahrnuje propustné textilie, plastové geomříže, kontinuální vlákna, stříž a nepropustné membrány. [4]

Geomembrány jsou obecně tenké polymerní desky, které se používají jako překážky proti prosakování tekutin v aplikacích pro ochranu životního prostředí, např. v kontejnerových systémech, skládkách, nádržích, kanálech nebo proti erozi půdy, ale také jsou používány v pozemních komunikacích či pozemních stavbách, např. v tunelech. Nejčastěji se geomembrány vyrábí z vysoko-hustotního polyethylenu (HDPE), lineárního nízko-hustotního polyethylenu (LLDPE) či polypropylenu (PP), popřípadě z polyvinylchloridu (PVC) v tloušťkách okolo 0,5 – 3 mm. [4,5]

Membrány vyrobené z polyethylenu mají obecně mimořádnou pevnost v tahu, jsou odolné vůči chemikáliím a mají dobré mechanické vlastnosti, [4,5]

1.3.1 Geomembrány Junifol

Izolační folie Junifol se vyrábí ze dvou základních materiálů, a to z vysoko-hustotního polyethylenu (HDPE) a lineárního nízko-hustotního polyethylenu (LLDPE) technologií ploché extruze. Folie Junifol se vyrábí ve dvou základních šířkách 5,1 a 8,0 m v rozmezí

tloušťek od 0,6 do 3,0 mm. Junifol je možné vyrábět jako jednovrstvou či vícevrstvou folii. Povrch folie nemusí být pouze hladký, ale lze ho vyrábět jako jednostranně či oboustranně strukturovanou folii. [6]

Výrobky se vyznačují výbornou chemickou i mechanickou odolností, ale i odolností vůči mikroorganismům, plísním a UV záření a také vůči propouštění plynů. Díky těmto vlastnostem se folie mohou využívat ve stavebním průmyslu, kde se uplatňují například při realizaci silnic a jiných pozemních komunikací, tunelů a podzemních staveb nebo nádrží a hrází. Dále se používají v těžebním, chemickém nebo energetickém průmyslu. [6]

Izolační folie Junifol se vyrábí ve dvou variantách, jako geomembrány nebo hydroizolační folie. [6]

1.3.2 Výroba geomembrán Junifol

Výroba samotné geomembrány podléhá přísným požadavkům daných certifikátů (např. BAM, DIBt, ÖNORM, KIWA, BECETEL, ASQUAL atd.).

Granulát a aditiva (ve formě masterbatche) jsou pomocí nasávačů dopravovány do jednotlivých dávkovacích šachet (viz Obr. 2). Jedná se o gravimetrické dávkovače, kde je každá dávka přesně odvážena na tenzometrických vahách, následně je promíchána a pomocí tláčené násypky dopravena do hrdla extruze. Jako vstupní suroviny se využívají HDPE, LLDPE či vlastní regranulát (ořezané okrajové pásy). Juta a.s. využívá granulát od firem SABIC, UNIPETROL RPA, BOREALIS, DOW atd.



Obr. 2: Dávkovací šachty + extruze

Navážená směs je v extruzní části linky převedena v taveninu pomocí kompresního (1:2) bariérového vačkového šneku pro optimalizaci míchání a snížení poklesu OIT v průběhu extruze. Jedná se o hlavní extruzní šnek o průměru 250 mm s délkou 38D vybavený evakuací (odplyněním). V případě výroby vícevrstevných folií se do linky přiřazuje druhý stejně dlouhý extruzní šnek o průměru 160 mm, také vybavený evakuací.

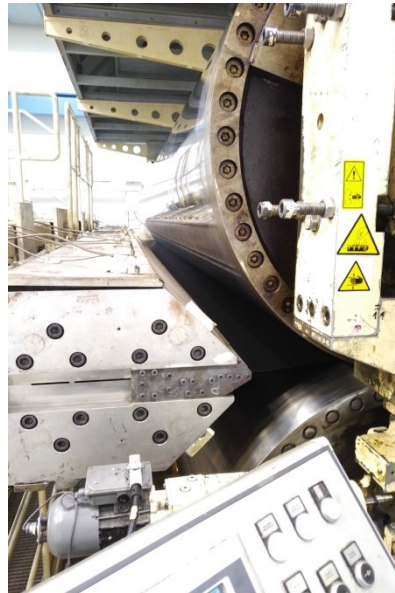
Ideálně připravená směs materiálů ve formě taveniny dále prochází filtračním blokem. Jedná se o dvou pístový čtyřcestný filtr. Jeho hlavní funkcí je filtrace případných shluků nedostatečně natavených částic a případných zesíťovaných částic. Dále slouží jako ochrana taveninového čerpadla.

Tavenina za sítím dále pokračuje k zubovému čerpadlu. Toto čerpadlo dodává na jednu otáčku přesně definovaný objem taveniny, a tím neustále udržuje konstantní tlak v ploché vytlačovací hlavě a eliminuje vyskytující se pulzace z extruzního šneku.

Tavenina dále pokračuje do směšovacího bloku zvaného „feedblock“, který se používá v případě výroby vícevrstevných folií. Za směšovacím blokem se mění kruhový průřez potrubí na oválný a tavenina vstupuje do ploché vytlačovací hlavy.

Plochá vytlačovací hlava na Obr. 3 (šíře chlopní 8600 mm) je vybavena vnitřním rozvodným kanálem, který slouží k ideální distribuci taveniny v kanálu, tím je zajištěno, že tavenina vystupuje z ploché vytlačovací hlavy v jejím středu i na krajích stejnou rychlostí.

K ovlivnění toku taveniny v ploché vytlačovací trysce se používají dva stupně regulace. Vnitřní rozvodný trámec, který obsahuje 86 šroubů, a regulační šrouby na výstupních chlopních (126 šroubů). Regulační šrouby na chlopních lze zaměnit za „termo“ šrouby, které v rámci kontinuálního měření reálné tloušťky folie automaticky její tloušťku regulují.



Obr. 3: Detail ploché vytlačovací hlavy

Celá extruzní část je vybavena čidly pro snímání teploty. Teplotní čidla se nachází v jednotlivých zónách extruzní linky, snímají teplotu taveniny před filtrem i před plochou vytlačovací hlavou. Linka je také vybavena tlakovými čidly snímající tlak před filtrem, tlak před taveninovým čerpadlem a tlak za filtrem.

Z ploché vytlačovací hlavy tavenina (215 – 225 °C) postupuje k válcům pro stabilizaci rozměru a tvaru. Víceválec (viz Obr. 4) sestává ze tří vertikálně uspořádaných válců. Každý válec má průměr 1200 mm a délku 9000 mm. Váha každého válce je 20 t. Válce jsou chlazeny vodou protékající v kanálech ve stěně válce. Tavenina vstupuje mezi první dva válce, kde se teplota jejich povrchů pohybuje v rozmezí 70 – 90 °C v závislosti na typu materiálu a tloušťce folie. Třetí válec funguje jako odváděcí a zároveň chladicí s teplotou 50 – 70 °C. Následně je folie vedena po tzv. relaxační dráze, kde pozvolna chladne na teplotu okolního prostředí (25 °C).



Obr. 4: Víceválec

Před navíjením je povrch folie jednoznačně identifikován laserovou nebo inkoustovou tiskárnou dle požadavku příslušných harmonizovaných EN norem.

Z každé role je odebrán vzorek, který je testován dle krátkodobých harmonizovaných EN norem v interní laboratoři. Jsou-li splněny všechny požadavky v rámci interní vnitřní kontroly, pak je role řádně označena a uvolněna zákazníkovi.

V případě testování dlouhodobých vlastností – stárnutí, propustnost vůči radonu, NCTL, SHT atd., je měření prováděno ve spolupráci s nezávislou akreditovanou laboratoří (PIB – Polymer Institute Brno, MPA Darmstadt, KIWA atd.). [7]



Obr. 5: Výsledný produkt – geomembrána

2 ROZDĚLENÍ PLASTŮ

Plasty jsou za běžných podmínek obvykle tvrdé a často i křehké materiály. Za zvýšené teploty se stávají plastickými a tvarovatelnými. Je-li změna z plastického stavu do tuhého vratná, jedná se o termoplasty, avšak jedná-li se o změnu nevratnou (jde o chemickou reakci), nazývají se reaktoplasty. Dále lze plasty dělit podle aplikace, nadmolekulární struktury, podle druhu přísad, polarit, chemické struktury nebo podle původu. [8]

Tato bakalářská práce je zaměřena na termoplasty, které lze snadno tvářet a zpracovávat různými technologiemi. Do tuhého stavu přejdou ochlazením pod teplotu tání T_m , tyto plasty označujeme jako semikrystalické, nebo ochlazením pod teplotu viskózního toku T_f , pak mluvíme o amorfních plastech. Protože při zahřívání nedochází ke změnám chemické struktury, ale jedná se pouze o fyzikální proces, lze proces měknutí a následné tuhnutí opakovat relativně bez omezení. Pod termoplasty se řadí polyolefiny (např. PE, PP), polystyren (PS), polyvinylchlorid (PVC), polyamid (PA) atd. [8,9]

2.1 Polyethylen (PE)

Polyethylen spadá do skupiny polyolefinů, které představují kvantitativně největší skupinu syntetických polymerů, což je dáno snadnou dostupností surovin pro výrobu monomerů a především tím, že jde o levnou výrobu. Chemicky se jedná o skupinu uhlovodíků s jednou dvojnou vazbou umístěnou na prvním uhlíku. [10,11]

U polyethylenu rozlišujeme dva základní typy. Pro jejich rozlišení máme různá kritéria. Původně se PE rozděloval podle způsobu přípravy, tedy na vysokotlaký a nízkotlaký PE. Později se ukázalo, že toto rozlišení není dostatečné, nyní se tedy PE rozděluje podle rozvětvení makromolekul, které určuje konečné vlastnosti. Mluvíme tedy o lineárním a rozvětveném polyethylenu. Lineární je také označován jako vysoko-hustotní (HDPE), rozvětvený pak jako nízko-hustotní (LDPE). Kromě nich dále existují i další typy, které nejsou ale vyráběny v tak velkém měřítku jako předchozí dva zástupci. Jedná se například o lineární nízko-hustotní PE (LLDPE) nebo o polyethylen o velmi vysoké molekulové hmotnosti (UHMW-PE). [10,11]

V dalších kapitolách je bližší specifikace věnována především HDPE a LLDPE z toho důvodu, že se jedná o hlavní suroviny používané ve firmě Juta a.s. na výrobu geomembrán.

2.2 Vysoko-hustotní polyethylen (HDPE)

2.2.1 Vlastnosti HDPE

Vysoko-hustotní polyethylen, zvaný také lineární, se vyznačuje menším rozvětvením bočních řetězců. Tato téměř pravidelná struktura umožňuje snadnou krystalizaci HDPE s krystalinitou 65 - 95 %. Vysoká krystalinita se projevuje vyšším modulem pružnosti a tvrdosti a snižuje propustnost pro plyny a páry. Oproti LDPE se vyznačuje stálostí proti organickým rozpouštědlům, kyselinám nebo alkoholům (s výjimkou velmi silných kyselin při zvýšených teplotách) a také odolností vůči praskání. Výhodou HDPE je recyklovatelnost a především není toxický a navlhavý, což předurčuje jeho použití v potravinářském průmyslu. K omezením HDPE patří vysoké smrštění ve formě, hořlavost a UV degradace. Lze ho zpracovávat všemi dostupnými technologiemi pro výrobu plastů. [10,11]

2.2.2 Výroba HDPE

HDPE je vyráběn pomocí iontové nebo komplexně-koordinační polymerace v nevodném prostředí. Proces je katalyzován Ziegler-Nattovými, Phillipsovými a metallocenovými katalyzátory a probíhá třemi typy polymerace – v suspenzi, roztoku nebo v plynné fázi. Díky katalyzátorům probíhá polymerace za mírných podmínek a struktura polymeru je vysoce lineární. [10,12,13]

Suspenzní polymerace probíhá v prostředí rozpouštědla, v němž je monomer rozpustný a polymer se v něm nerozpouští. Proces probíhá v jediném reaktoru při tlaku do 4 MPa a teplotách pod 100 °C za intenzivního míchání a chlazení. Protože po polymeraci ve směsi polyethylenu zůstává zbytek katalyzátoru a jeho odstranění je velmi náročné, probíhá výroba HDPE především polymerací v roztoku či v plynné fázi. [10,12,13]

Při roztokové polymeraci HDPE se využívá Ziegler-Nattova katalyzátoru a rozpouštědla, v němž je zcela rozpustný jak monomer, tak i polymer. Proces probíhá kontinuálně v reaktoru, na rozdíl od suspenzní polymerace se ale pracuje s vyššími tlaky a teplotami. Výhodou je snadné odstranění katalyzátoru z výsledného produktu pomocí filtrace. [10,12,13]

Polymerace v plynné fázi je založena na polymeraci plynného ethylenu ve fluidní vrstvě. Používá se Phillipsův katalyzátor na bázi chromu o vysoké účinnosti, který se nemusí z polymeru odstraňovat. Tímto způsobem HDPE vzniká krystalický polyethylen. [10,12,13]

2.2.3 Použití HDPE

Díky svým výborným vlastnostem a zdravotní nezávadnosti se HDPE využívá především v potravinářství a obalové technice. V tomto odvětví se využívá hlavně ve formě sáčků a folií, které jsou mnohem tenčí a pevnější než podobné výrobky z LDPE. Takovéto folie jsou známé pod obchodním označením mikroten. Další využití HDPE nachází v průmyslu jako materiál na opláštění kabelů proti mechanickému poškození, na výrobu plynového nebo vodovodního potrubí, v chemickém průmyslu na výrobu speciálních aparatur a laboratorního nádobí a v neposlední řadě ve stavebnictví, kde jeho nízká propustnost pro vodu dává dobré předpoklady pro použití HDPE jako hydroizolační folie. S vysoko-hustotním polyethylenem se ale nejčastěji setkáme jako s výrobky denní spotřeby (např. uzávěry lahví, hračky pro děti). [10,12-14]

2.3 Lineární nízko-hustotní polyethylen (LLDPE)

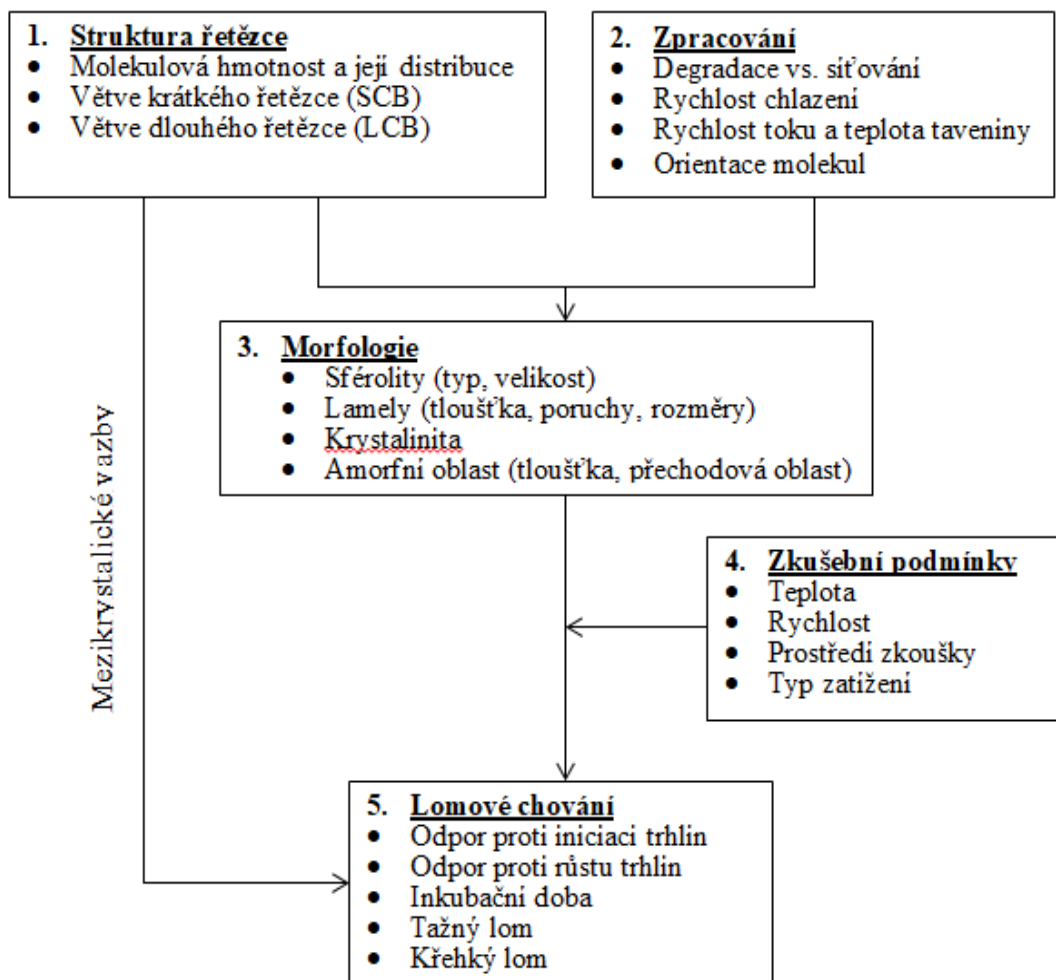
Lineární nízko-hustotní polyethylen patří mezi nejmladší, avšak nejdůležitější zástupce polyethylenu. Pro strukturu LLDPE jsou typické krátké postranní řetězce. Strukturou se od LDPE liší právě tím, že LDPE má menší počet bočních řetězců, jsou ale delší a silně rozvětvené, zatímco LLDPE má více bočních řetězců bez dalšího větvení. Tyto vlastnosti způsobují, že nízko-hustotní polyethylen má nízkou krystalinitu (okolo 50 %) vzhledem k velkému počtu krátkých řetězců. Právě to způsobuje jeho nízkou hustotu. LLDPE se vyznačuje vyšší rázovou houževnatostí, pevností v tahu a odolností vůči propíchnutí a prodloužení než LDPE. Oproti HDPE má lepší zpracovatelské vlastnosti a je odolnější vůči tvorbě trhlin pod napětím. [12,15-19]

Lineární nízko-hustotní polyethylen je vyráběn kopolymerací ethylenu a vyššího α -olefinu, např. 1-butenu. Polymerační cyklus probíhá v plynné nebo kapalné fázi obdobně jako výroba HDPE. Nejčastěji je celý cyklus katalyzován Ziegler-Nattovými katalyzátory. Vedle 1-butenu lze využít jako komonomery 1-hexen, 1-okten nebo 4-methyl-1-penten, které zlepšují výsledné vlastnosti polymeru. [12,15-19]

Hlavní aplikací LLDPE jsou folie, které nachází uplatnění ve všech oblastech průmyslu od potravinářství až po zemědělství. Právě v zemědělství se používají jako hydroizolační folie, protože LLDPE vykazuje dobrou odolnost vůči vodě. LLDPE se zpracovává především vyfukováním, jeho zpracování ale není snadné, proto se často používá se směsích s LDPE, kde LLDPE zajišťuje pevnost, zatímco LDPE napomáhá lepší zpracovatelnosti. [12,15-19]

3 PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ ŽIVOTNOST GEOMEMBRÁN Z POLYETHYLENU

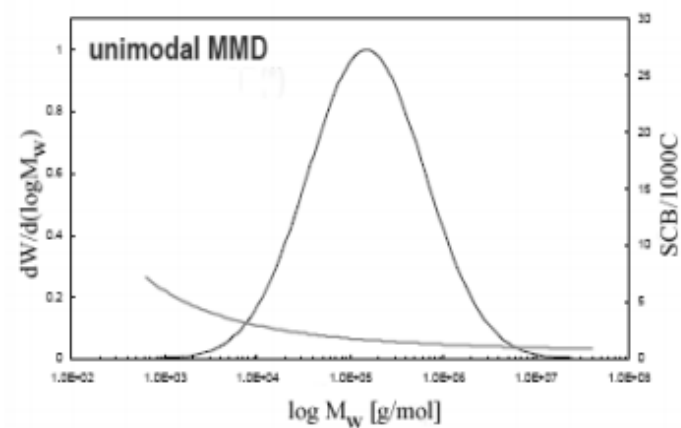
Životnost geomembrán vyrobených z PE, ale i jiných materiálů, je ovlivněna velkým počtem parametrů. Na Obr. 6 je zjednodušená představa o těchto parametrech. Mezi hlavní zástupce této problematiky patří struktura řetězce (molekulová hmotnost a její distribuce, počet, typ a rozložení krátkých a dlouhých větví), morfologie a podmínky zpracování. Z pohledu nadmolekulární struktury geomembrán má největší vliv na životnost PE geomembrán distribuce molekulových hmotností a typ komonomerů, které jsou dále blíže diskutovány. Ostatní vlivy jsou anulovány díky technologickým postupům a vybavením laboratoře. [20]



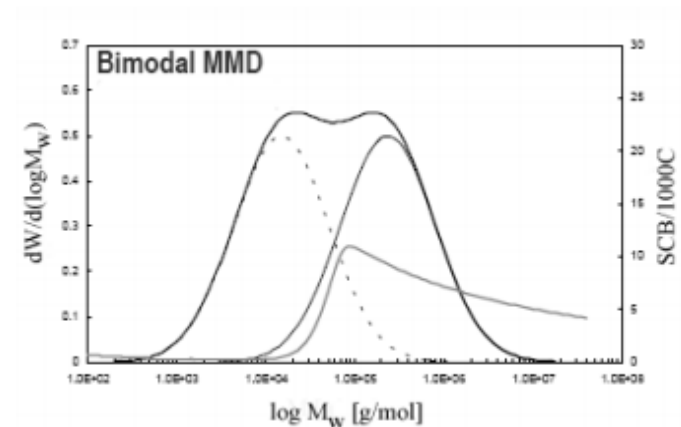
Obr. 6: Vztah mezi strukturou, morfologií a lomovým chováním [20]

Molekulová hmotnost a boční větve mohou výrazně ovlivnit lomové chování. Podle distribuce molekulové hmotnosti můžeme polyethylen rozdělit do dvou skupin – PE s úzkou distribucí molekulové hmotnosti, který je znázorněný na Obr. 7 a PE s širokou distribucí molekulové hmotnosti (viz Obr. 8). PE s úzkou distribucí molekulové hmotnosti má horší zpracovatelské vlastnosti a lepší mechanicko-fyzikální vlastnosti oproti PE s širokou distribucí molekulových hmotností, který má lepší zpracovatelské vlastnosti a horší mechanicko-fyzikální vlastnosti. Stanovení molekulových hmotností a jejich distribuce se provádí pomocí gelové permeační chromatografie (GPC). [20-22]

Vývoj polyethylenu se dnes již nezaměřuje pouze na výrobu unimodálních typů (tzn. distribuce molekulových hmotností vykazuje jeden pík), ale v poslední době směřuje k vývoji bimodálních typů PE (distribuce molekulových hmotností má dva píky, z nichž první pík bimodálního materiálu zodpovídá za dobré zpracování, druhý pík pak ovlivňuje mechanicko-fyzikální vlastnosti). Bimodální typy vzhledem ke své struktuře vykazují dlouhou životnost. Koncem 50. let 20. století byla vyvinuta první generace polyethylenu, v té době nejčastěji využíván k výrobě potrubí. Tento PE se označuje jako PE63. Druhá generace nastupuje počátkem 70. let minulého století a je označována jako PE80. Zatímco tyto dva typy PE vykazují unimodální distribuci molekulových hmotností, třetí generace HDPE, označovaná jako PE100, má bimodální distribuci molekulových hmotností. Bimodální struktura polyethylenu je získána díky kaskádovému procesu výroby, kde ve dvou fázích reakce výsledný polymer obsahuje jak frakci o vysoké molární hmotnosti, tak frakci o nízké molární hmotnosti. Bimodální typ HDPE má díky své unikátní distribuci molekulových hmotností výrazně lepší tuhost, pevnost, houževnatost a odolnost proti pomalému šíření trhliny (SCG) ve srovnání s unimodálním typem PE. Umístění bočních větví ve vysokomolekulárních podílech materiálu dává bimodálním typům HDPE vysokou odolnost proti pomalému šíření trhliny. [20-22]



Obr. 7: Záznam z gelové permeační chromatografie (GPC) pro unimodální typ HDPE [21]



Obr. 8: Záznam z gelové permeační chromatografie (GPC) pro bimodální typ HDPE [21]

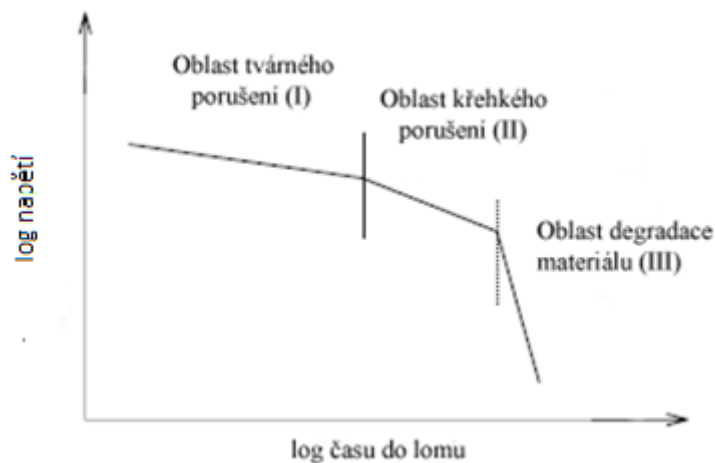
4 MEZNÍ STAVY MATERIÁLŮ GEOMEMBRÁN

Mezním stavem je myšlen takový stav, kdy těleso vyrobené z daného materiálu a podrobené mechanickému namáhání ztrácí schopnost přenášet napětí nebo kdy jeho deformace překročí stanovený limit. U geomembrán můžeme definovat mezní stav jako stav, kdy těleso či jeho část ztrácí funkci přenášet provozní zatížení. [21,23,24]

V podstatě existují dva mezní stavy, které limitují životnost HDPE v geomembránách. Jedná se o křehký lom po dlouhé době provozu (slow crack growth – SCG) a rychlé šíření trhliny (rapid crack propagation – RCP). Hlavními parametry, které ovlivňují lomové chování geomembrán, jsou struktura řetězce, morfologie a podmínky zpracování. [21,23,24]

4.1 Křehký lom po dlouhodobém namáhání

Křehký lom nastává při dlouhodobém namáhání mechanismem pomalého šíření trhliny (SCG). Tento mezní stav se děje v důsledku dlouhodobého působení napětí, které je výrazně nižší než mez kluzu. Jsou tedy potlačeny možnosti vzniku plastických deformací. Náchylnost konstrukce ke křehkému lomu narůstá s klesající teplotou, s růstem rychlosti zatěžování nebo s vnitřním pnutím v materiálu. [25,26]



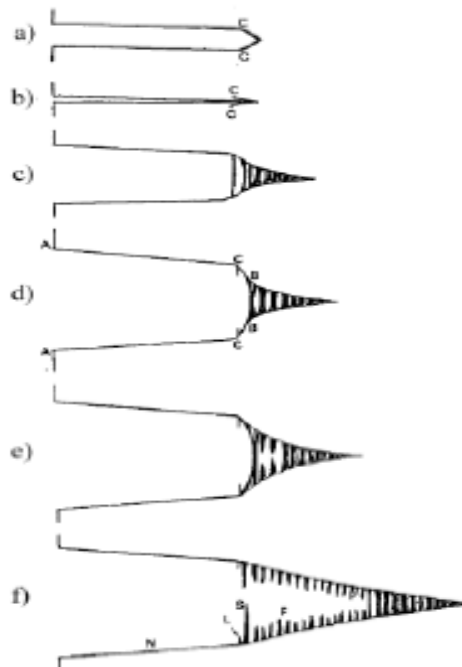
Obr. 9: Závislost napětí na čase do lomu [21]

Schéma na Obr. 9 popisuje závislost napětí na čase do lomu HDPE geomembrány. V první oblasti dojde k tvárnému porušení vlivem plastické deformace. Ve druhé oblasti dojde ke křehkému lomu, který je závěrečnou fází mechanismu pomalého šíření trhliny, který ovlivňuje životnost geomembrány. Ve třetí oblasti se jedná o chemickou degradaci materiálu. [21]

4.1.1 Mechanismus pomalého šíření trhliny

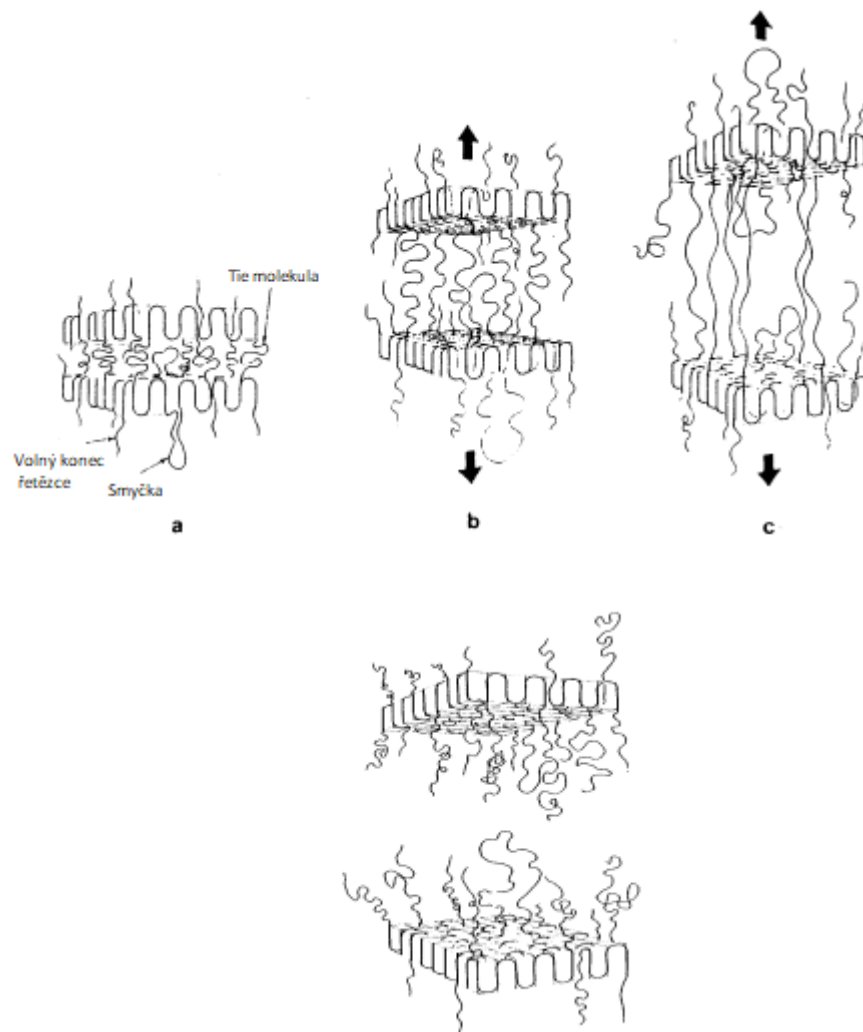
Mechanismus pomalého růstu šíření trhlín se projevuje u PE výrobků, které jsou vystaveny hodnotám napětí nižším, než je mez kluzu daného materiálu v dlouhodobém měřítku. Mechanismus je vícestupňový proces, skládající se z iniciace a samotného šíření trhliny. Iniciace nastává nejčastěji v důsledku koncentrace napětí v podobě mikrotrhlín a vrubů, které vznikly při výrobě nebo manipulaci. Jakmile dojde k iniciaci trhliny, trhlina se dále šíří v závislosti na hnací síle, tzn. vlivem externího zatížení a schopnosti materiálu odolávat růstu trhliny. Na iniciaci nově vzniklé lomové plochy je nezbytné poměrně velké energie, zatímco pro růst již vzniklé trhliny je zapotřebí energie podstatně méně. Požadovaná energie je závislá především na materiálových vlastnostech, tloušťce stěny a teplotě. [20,21,25,26]

V místě koncentrace napětí (trhlina, vrub) vzniká tzv. krejz (viz Obr. 10). V oblasti před čelem trhliny či vrubu vzniknou nejprve mikrodutiny, které se vlivem mechanického zatížení zvětšují, což vede k tvorbě fibril. V základě krejzu se vytváří pevný film. Při rozšiřování krejzu svírají deformované oblasti úhel 45° se směrem šíření trhliny. [20,21,25,26,27]



Obr. 10: Iniciace a růst trhliny v krejzu, a) poškození v okamžiku vložení žiletky, b) po odstranění žiletky, c) po částečném zatížení, d) po úplném zatížení, e) iniciace trhliny, f) růst trhliny

K iniciaci trhliny dochází ve fibrilách, které jsou vlivem působícího napětí zeslabeny. Zeslabení a následný lom fibril na molekulární úrovni dochází vlivem rozplétání a štěpení tie (spojovacích) molekul, což je znázorněno na Obr. 11. Schéma představuje strukturu PE bez působení zatížení (a). Při aplikaci zatížení se molekuly natahují (b) a při dlouhodobém zatížení se začínají uvolňovat a rozplétat (c). Takto natažené řetězce dosáhnou nakonec kritické hodnoty, kdy dochází ke křehké deformaci (d). Odolnost vůči prodlužování fibril je hlavní materiálovou vlastností určující odolnost materiálu vůči SCG. [20,21,25,26,]



Obr. 11: Rozplétání „tie“ molekul ve fibrilách [21]

Krátce po iniciaci trhliny dojde k porušení pevného filmu křezu. Trhlina se rychle rozšiřuje a poté se její růst zastaví. Příčinou je zvětšující se pevnost fibril směrem ke špici křezu. Následuje opětovný růst křezu, tvorba pevného filmu, iniciace trhliny a celý proces se opakuje. Po každé další iniciaci dojde k výraznějšímu růstu trhliny. Děje se to v závislosti

na délce křezu, protože platí, že čím je délka křezu větší, tím větší vzdálenost může trhlina urazit. [26,20,21,27]

4.2 Rychlé šíření trhliny

Druhým mezním stavem je rychlé šíření trhliny (RCP). K RCP dochází vlivem několika faktorů, mezi něž mimo jiné patří rázové zatížení, porušení povrchu (škrábance, vruby) a nevhodné uložení (bodové zatížení). Vlivem těchto faktorů může v materiálu vzniknout trhlina, která je schopná nestabilního šíření. [20,21,26,]

Průběh RCP lze rozdělit do dvou stádií – iniciaci trhliny a její propagaci. Iniciace trhliny je způsobena defekty (koncentrátory napětí) vzniklých z důvodu mimořádných provozních podmínek, tak i v místě pomalého šíření trhliny (SCG). Růst RCP je určován materiálovými vlastnostmi, geometrií a rychlostí celého systému. [21,26]

Tento mezní stav však není u geomembrán typický, proto nebude blíže diskutován.

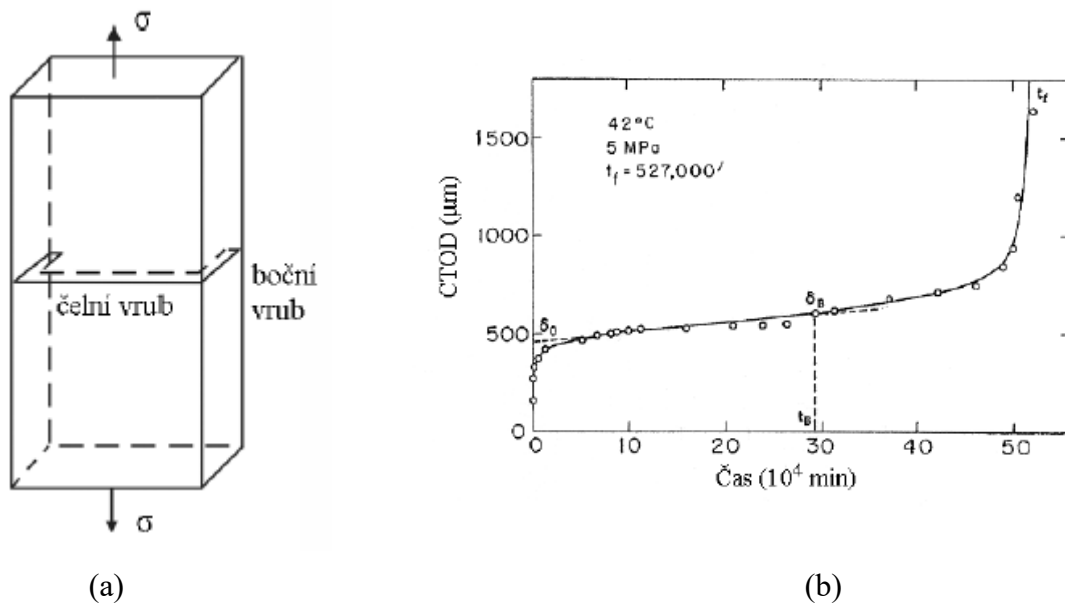
5 VÝVOJ METOD

Požadavky kladené na izolační materiály vyrobené z HDPE se stále stupňují v závislosti na zvyšujících se nárocích a požadavcích zákazníků. Výrobci deklarují pevnost a houževnatost výrobků na základě standardních testů, které zaručují zachování těchto vlastností při konkrétních aplikacích.

Dosud používané testy ke stanovení životnosti začaly být nedostatečné či nepoužitelné vzhledem k dlouhé zkušební době často přesahující několik měsíců, protože z ekonomických a praktických důvodů musí být zkušební metody proveditelné v relativně krátké době. Proto bylo v posledních letech vyvinuto několik metod charakterizujících odolnost proti SCG u moderních druhů PE trubek, z nichž některé byly postupně aplikovány i na PE geomembrány. Běžně používané metody jsou Pennsylvania Edge Notch Tensile (PENT) test, Full Notch Creep Test (FNCT), Notch Constant Tensile Load (NCTL) test. Tyto metody se považují za urychlené testy stárnutí pro unimodální typy materiálů, ale s vývojem bimodálních typů začaly být nedostatečné z důvodu příliš dlouhé doby testování (v řádech tisíců hodin). Proto se začalo přemýšlet o nových metodách, které by umožnily kontrolu výrobku přímo ve výrobě. Za jediný použitelný test zrychleného stárnutí pro bimodální typy PE je v současnosti považován Strain Hardening (SH) test, na jehož výzkumu se stále pracuje. [23]

5.1 Pennsylvania edge notched test (PENT)

PENT test, který byl vyvinut a zaveden N. Brownem a jeho společníky, je využíván zejména v USA pro měření odolnosti proti pomalému růstu trhliny především pro polyethylenová potrubí. Zkušební tělesa jsou namáhána při standardních podmínkách pro zkoušku PENT, a to při teplotě 80 °C a tlaku 2,4 MPa. Zvýšená teplota umožňuje stanovit životnost materiálu v relativně krátkém čase za podmínek, které modelují chování materiálu po dlouhé době provozu. Zvýšení podmínek o 1 °C zkracuje čas do lomu o 10 %, avšak zvýšení teploty nad 80 °C může vést k nežádoucím změnám mechanismu porušení. Výsledkem zkoušky je závislost otevření trhliny (CTOD) na čase (Obr. 12b). Na základě tohoto záznamu lze stanovit několik parametrů charakterizujících odolnost materiálu proti SCG. Těmito parametry jsou čas pro iniciaci SCG t_i , rychlost SCG $d(COD)/dt$ a čas do selhání materiálu t_f . Norma umožňuje testovat tělesa odebraná buď z lisovaných desek, nebo přímo z trubek připravenými extruzí. Každé těleso musí být opatřeno vrubem vytvořeným vtlačováním ostré žiletky konstantní rychlostí 330 $\mu\text{m}/\text{min}$ (Obr. 12a). [21,28,29]



Obr. 12: Zkušební těleso (a), závislost CTOD na čase (b) [21]

5.2 Full-notch creep test (FNCT)

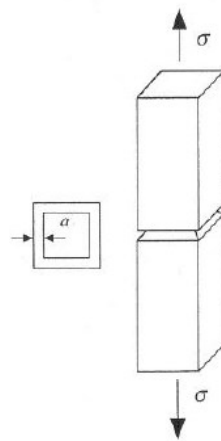
Zkouška FNCT je často používána k charakterizaci odolnosti PE materiálů proti pomalému šíření trhliny (SCG) za použití detergentů. Metoda byla vyvinuta S. Hesselem a E. Maurem a je převážně využívána v Evropě jako standardizovaná zkušební metoda (ISO 16770). Jako zkušební tělesa se používají hranoly o definované délce a průřezu, které mohou být vyseknuty z lisovaných desek. Každé zkušební těleso musí být opatřeno obvodovým vrubem, jehož hloubka je normována, a který slouží k iniciaci šíření trhliny. Takové těleso je pak zatěžováno statickým tahem za zvýšené teploty a současného působení detergentu (Arcopal). Teplota a detergent působí jako urychlující prostředky. [21,30,31]

Pro standardní postup podle normy ISO 16770 se nejprve pro daný materiál vybere v souladu s normou vhodná zkušební napětí a teplota, při níž bude zkouška prováděna a díky které zajistíme křehký mechanismus porušení zkušebního tělesa. Zkouška se provádí na 5 sadách měření, každá obsahuje nejméně 4 tělesa, která jsou namáhána různými úrovněmi nominálního napětí, které leží blízko hodnoty zvoleného zkušebního napětí. Tímto se kompenzuje variabilita v hodnotách plochy průřezu pod vrubem, k níž dochází v důsledku vrubování zkušebních těles (viz Obr. 13). Aktuální hodnoty aplikovaného napětí σ_L se vypočítají podle rovnice 1 a následně se vynesou do grafu skutečného napětí σ_L na čase do lomu t_f . Ze získané závislosti se stanoví pro dané zkušební napětí hledaný čas do lomu.

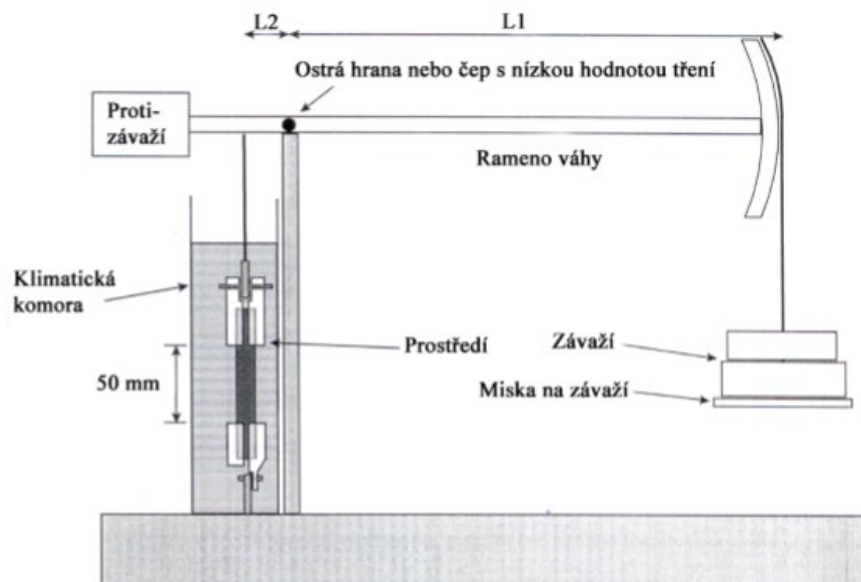
Pro moderní materiály jsou nejčastěji uváděné doby porušení až 8760 hodin (1 rok).
[21,30,31,32]

$$\sigma_L = \frac{9,81 \cdot R \cdot M}{A_L} \quad (1)$$

kde M je hmotnost závaží [kg], A_L je průřez tělesa [mm^2], σ_L je aplikované napětí [MPa], R je poměr ramen zatížení (L_1/L_2), 9,81 je konstanta pro tíhové zrychlení.



Obr. 13: Zkušební těleso [21]



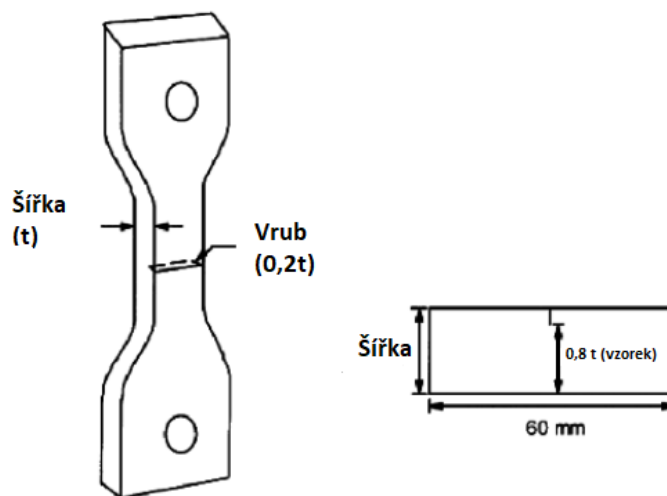
Obr. 14: Schéma zkušebního zařízení pro zkoušku FNCT [21]

5.3 Notched constant tensile load test (NCTL)

Metoda NCTL byla vyvinuta na počátku 90. let v Americe. Jedná se o zkoušku v tahu při konstantním zatížení a dnes je celosvětově využívána jako norma ASTM D 5397-99 určená k testování odolnosti geomembrán proti pomalému šíření trhlin (SCG). Také existuje identická norma ČSN EN 14576. Tato metoda je obdobou FNCT (viz. kapitola 5.4) Stejně jako výše popsaná zkouška FNCT i metoda NCTL využívá několika podmínek, které přispějí ke zkrácení doby do selhání materiálu. Jedná se o přesně definovaný vrub, který v místě zářezu vyvolá velkou koncentraci napětí a přispěje ke vzniku trhlin, stejně tak zvýšená teplota a přítomnost detergentu zajistí tvorbu trhlin a vznik lomu, a tím výrazně zkrátí dobu testování. Podle normy ASTM v plném měřítku je test časově i finančně náročný, proto se přistupuje ke zjednodušené variantě, viz kapitola 5.3.3. [33,34]

5.3.1 Příprava zkušebních těles

Zkušební tělesa jsou odebírána z geomembrán ve tvaru oboustranných lopatek o přesně definovaných rozměrech. Tloušťka těles odpovídá tloušťce geomembrány. Doba selhání geomembrány pak závisí na této tloušťce, protože platí, že vzorky s větší tloušťkou mají delší dobu selhání, než vzorky s malou tloušťkou v závislosti na změně hustoty. Každé těleso je opatřeno vrubem, který by neměl být hlubší než 20 % nominální tloušťky vzorku (viz Obr. 15). Pro každý testovací soubor se vyřízne nejméně 30 vzorků, podmínkou je, aby byly z geomembrány vyseknuty v jednom směru. [33,34]



Obr. 15: Zkušební těleso pro NCTL s definovaným vrubem [33]

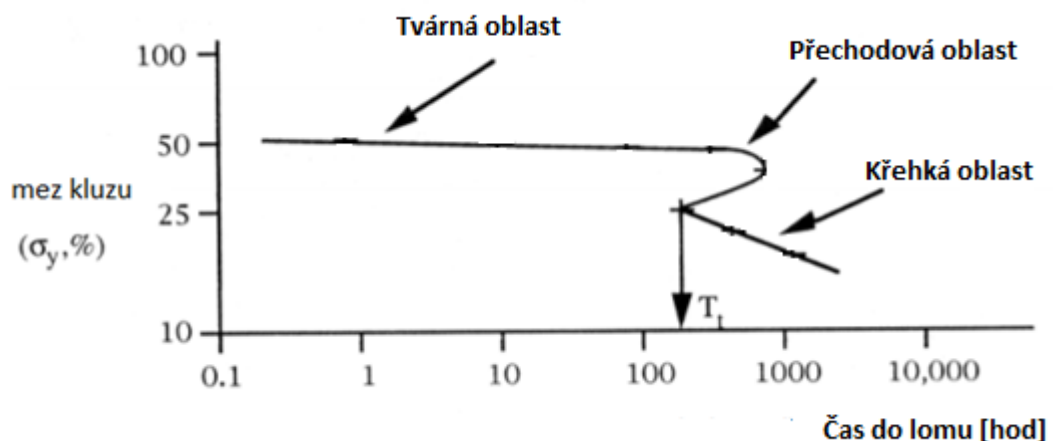
5.3.2 Zkušební postup

Pro každou sadu testovacích těles se změří mez kluzu materiálu podle zkušební metody ASTM D 638, respektive ČSN EN 527-3, která se poté použije na výpočet procenta aplikovaného zatížení podle vzorce 2.

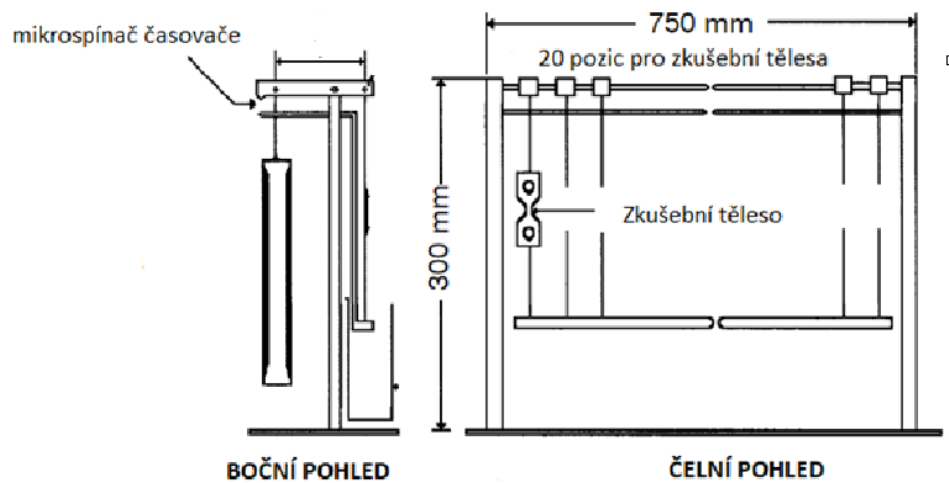
$$F = A \cdot \sigma_y \cdot w \cdot t_L \cdot \frac{1}{MA} \quad (2)$$

kde F je síla použitá na dosažení určité meze kluzu [N], A je požadované procento meze kluzu [-], σ_y je mez kluzu materiálu při pokojové teplotě [N/mm²], w je šířka krku zkušební tělesa [mm], t_L je tloušťka zkušební vzorku, tj. 80 % nominální tloušťky [mm], MA je pákový převod zkušebního zařízení, tj. 3,0 pro přístroj znázorněný na Obr. 17. [33,34]

Zkušební vzorky se upnou do zkušebního přístroje tak, aby nedošlo k ohnutí, kroucení nebo prokluzování tělesa a nastaví se vzdálenost mezi ramenem a vypínačem na 20 cm. Zkušební tělesa se ponoří do připravené a vyhřáté zkušební lázně (50 ± 1 °C), která obsahuje 10 % povrchově aktivní látky a 90 % destilované vody. Jako povrchově aktivní látka se používá Igepal CO-630 (nonylphenoxy poly(ethylenoxy)ethanol). Před samotným měřením by vzorky měly být temperovány v lázni minimálně po dobu 30 minut. Výsledkem zkoušky je graf závislosti aplikovaného napětí na čase do lomu, viz Obr. 16. Uvedený graf demonstruje, že zkouška je platná pouze v křehké oblasti materiálu. Tomu odpovídá i minimální hodnota doby selhání HDPE, která je podle této zkušební normy stanovena na 250 hodin. [34] Pokud při zkoušce dojde k porušení materiálu po více jak 1000 hodinách, dochází u vzorku k termo-oxidační degradaci, která negativně ovlivňuje výsledky zkoušky. [33,34]



Obr. 16: Závislost aplikované meze kluzu na čase do lomu [34]



Obr. 17: Schéma zkušebního zařízení pro zkoušku NCTL [33]

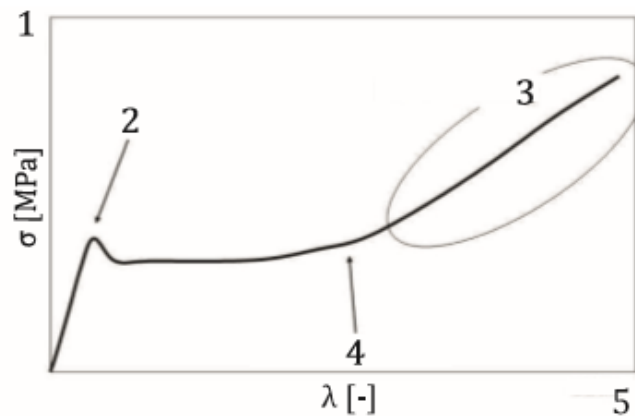
5.3.3 Single point notch constant tensile load test (SP-NCTL)

Norma ASTM D 5397- popisuje předchozí postup zkoušky, ale v reálném provozu se nepoužívá z důvodu příliš dlouhých časů do lomu. Z toho důvodu se prakticky postupuje podle dodatku normy ASTM, tedy metodu SP-NCTL, která díky nastaveným podmínkám čas do lomu výrazně zkracuje. Zkouška se provádí na šesti zkušebních tělesech vyseknutých z geomembrány ve směru vytlačování a 6 zkušebních těles ve směru kolmém na směr vytlačování. Ve většině případů se však zkouška omezuje pouze na testování těles vyseknutých ve formě kolmém na směr vytlačování, protože takto připravené vzorky vykazují kratší dobu do porušení. Určí se hodnota zatížení odpovídající 30 % meze kluzu. Ukončení zkoušky může být provedeno dvojím způsobem. Testování je buď ukončeno po předem stanovené době, nebo test pokračuje do doby, než dojde k lomu všech šesti těles. Výsledkem zkoušky je graf závislosti aplikovaného napětí na čase do lomu (Obr. 16). [34]

5.4 Strain hardening test (SHT)

Mezinárodní norma ČSN ISO 18488 popisuje metodu pro stanovení modulu deformačního zpevnění v tahu, který se používá pro stanovení odolnosti proti pomalému šíření trhlin (SCG) v polyethylenu. Důležitá úloha základní sítě molekulárního spletení se odráží v chování při mechanickém zpevnění. Předpokládá se, že množství tohoto mechanického zpevnění při zkoušce tahem je měřítkem odolnosti vůči deformaci fibril polyethylenu. Modul deformačního zpevnění se získá ze závislosti křivky napětí na deformaci (Obr. 18) nad

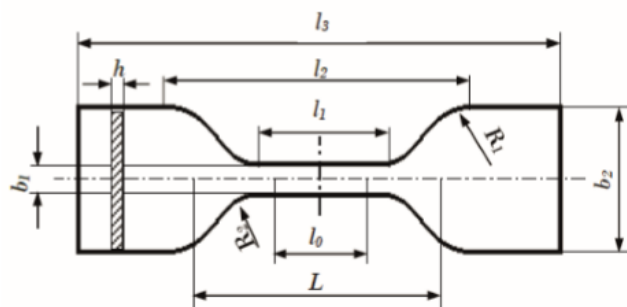
přirozenou tažností materiálu, zejména při zvýšené teplotě. Hodnota modulu deformačního zpevnění se vypočte pomocí Neo-Hookeova konstitučního modelu. [35]



Obr. 18: Závislost napětí na deformaci [35],
kde 1 – napětí, 2 – mez kluzu, 3 – deformační zpevnění, 4 - přirozený
dloužící poměr, 5 – deformace

5.4.1 Příprava zkušebních těles

Zkušební těleso ve tvaru oboustranných lopatek (Obr. 19) musí mít velkou plochu, aby bylo zabráněno prokluzování v upínacích čelistech. Zkušební tělesa se vyrazí z vylisované folie anebo z hotového produktu – geomembrány). Vzorky musí být kondicionovány v sušárně při teplotě $(120 \pm 2)^\circ\text{C}$ po dobu 1 hodiny a pomalu ochlazeny na pokojovou teplotu. Z takto upravených folií se vysekne pět zkušebních vzorků. Vzorky nesmí obsahovat žádné deformace, trhliny nebo jiné nepravidelnosti. [35]



Obr. 19: Zkušební vzorek [35]

5.4.2 Zkušební postup

Zkušební metoda je prováděna na nejméně pěti zkušebních tělesech, u nichž je přesně změřena šířka a délka, a které se před zahájením samotné zkoušky kondicionují po dobu 30 minut v teplotní komoře při $(80 \pm 1)^\circ\text{C}$. Takto připravené vzorky se upnou do čelistí zku-

šebního zařízení tak, aby se zabránilo proklouznutí a poškození vzorku. Testování se provádí v teplotní komoře při teplotě $(80 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$, je zvoleno předpětí 0,4 MPa a rychlost 5 mm/min. Následně je zaznamenáváno, jak velké zatížení a prodloužení na vzorek působí. Dloužící poměr se použije z rozmezí $\lambda = 8,0$ až $\lambda = 12,0$ nebo až po porušení vzorku. V případě, že vzorek praskne při hodnotě menší než $\lambda = 8,5$, vzorek musí být ze souboru měření vyloučen. [35]

Dloužící poměr se vypočte z rovnice 3:

$$\lambda = \frac{l}{l_0} = 1 + \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3)$$

kde l je vzdálenost mezi značkami ve středu tělesa [mm], l_0 je standardní délka zkušební tělesa [mm], Δl je nárůst délky zkušební tělesa mezi značkami [mm].

Skutečné napětí se vypočítá podle vzorce 4 za předpokladu, že je zachován objem tělesa mezi značkami.

$$\sigma_{skutečné} = \lambda \cdot \frac{F}{A} \quad (4)$$

kde F je naměřená síla [N], A je průřez daného zkušební tělesa [mm²].

Neo-Hookovský konstituční model je reprezentován vzorcem 5 a používá se k extrapolaci naměřených dat, z nichž se vypočítá modul deformačního zpevnění ($\langle G_p \rangle$), který vyjadřuje sklon Neo-Hookovského konstitučního modelu mezi skutečným napětím a nejvyšším bodem dloužícího poměru, ne však většího než $\lambda = 12$.

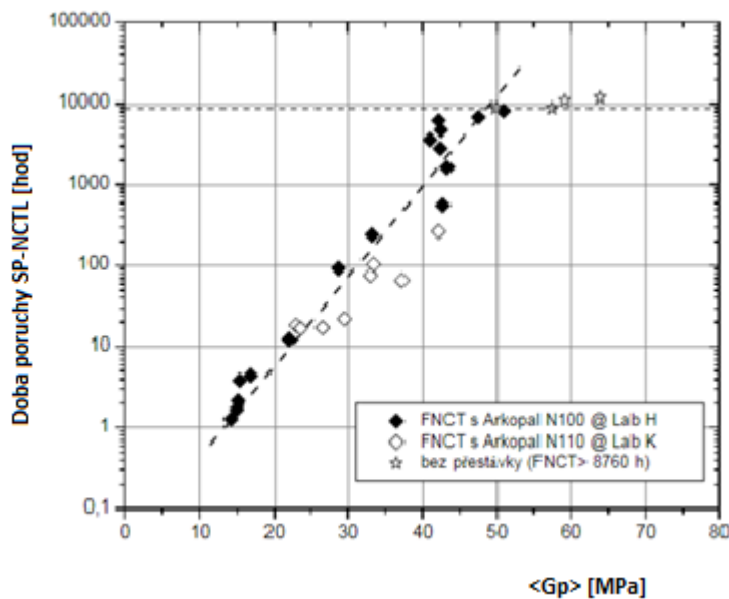
$$\sigma_{skutečné} = \frac{\langle G_p \rangle}{20} \cdot \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right) + c \quad (5)$$

kde $\langle G_p \rangle$ je modul deformačního zpevnění [MPa], λ je dloužící poměr [-], c je matematický parametr konstitučního modelu popisující mez kluzu extrapolovaný na hodnotu $\lambda = 0$ [-]. [335]

6 KORELACE SHT A NCTL PRO GEOMEMBRÁNY

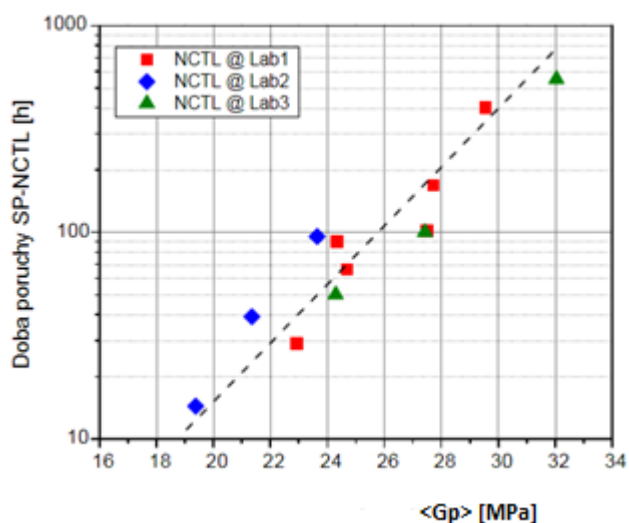
Tradičním testem pro stanovení životnosti HDPE geomembrán je NCTL test, který využívá zkušební tělesa s vrubem, detergentu a zvýšené teploty pro zkrácení doby selhání materiálu (identifikace životnosti vzorku). HDPE se ale vyznačuje vysokou odolností proti šíření trhliny, proto je testování pomocí NCTL velmi časově náročné. Při použití metody SP-NCTL se časy selhání materiálu pohybují v řádech tisíců hodin při zatěžovacím poměru 30 % meze kluzu. Z toho důvodu se v poslední době pracuje na vývoji nových metod pro rychlé stanovení životnosti HDPE geomembrán. Jednou z těchto metod je jednoduchá tahová zkouška (SHT) prováděná při 80 °C bez použití povrchově aktivních látek, kterou v roce 2005 zavedl Kurelec s kolektivem. Výsledný modul deformačního zpevnění $\langle G_p \rangle$ se určí ze sklonu křivky závislosti zatížení na dlouhícím poměru. Takto stanovený modul deformačního zpevnění dobře koreluje s naměřenými dobami selhání zjištěnými pomocí NCTL pro geomembrány a FNCT pro nativní materiály. [36-39]

Havermans a kolektiv v roce 2010 testoval širokou škálu polyethylenů s různou odolností proti šíření trhlín. Nalezl dobrou korelaci mezi dobami selhání při zkoušce FNCT a SHT. Lze proto konstatovat, že modul deformačního zpevnění je určen stejnými parametry, které řídí odolnost proti pomalému šíření trhlíny v HDPE, jinými slovy korelace mezi SHT a FNCT existuje. Obr. 20 ukazuje data publikovaná Havermansem a kolektivem. Jedná se o korelaci mezi dobou do lomu pomocí FNCT metody a modulem deformačního zpevnění $\langle G_p \rangle$. Graf ukazuje FNCT naměřený ve dvou různých laboratořích. Po uplynutí doby testování větší než 8760 hodin byl test zastaven, protože by hrozilo znehodnocení zkušebních těles vlivem termo-oxidační degradace. [36-39]



Obr. 20: Závislost času do lomu FNCT stanovený metodou modulu deformačního zpevnění [37]

Zazinger v roce 2018 publikoval výsledky korelace SHT vs. NCTL na geomembránách. Na Obr. 21 je znázorněn modul deformačního zpevnění vyneseny proti časům do lomu v testech SP-NCTL - měřeno ve třech různých laboratořích. Byla nalezena dobrá korelace mezi časy selhání SP-NCTL a $\langle G_p \rangle$. Čím vyšší je hodnota $\langle G_p \rangle$, tím vyšší jsou doby selhání v testech SP-NCTL. Z grafu lze vyčíst, že pro zkoumané HDPE geomembrány byly nalezeny moduly pro zpevnění deformací mezi 19,4 MPa a 32,0 MPa. [36-39]



Obr. 21: Závislost doby porušení materiálu metodou SP-NCTL na modulu deformačního zpevnění [36]

Ačkoli korelace mezi SHT testem a NCTL či FNCT testy byly prokázány, výsledky po řadě testování ale ukazují, že korelace nemusí být nalezena vždy, protože NCTL test je velmi citlivý nejen na různé zkušební podmínky (např. kvalita činidla, vrubu, době testování atd.), ale i na další vlivy jako počet bočních větví na tisíc uhlíků (CH₃/1000C), směsování materiálů s různým typem komonomeru, přidávání regranulátu – to jsou aktuálně probíhající výzkumy a vývoje v rámci CEN a ISO. [36-39]

Korelace byly spolehlivě nalezeny pro nativní materiály. Zavedení SHT je výhodné z toho důvodu, že kompletní test trvá maximálně 24 hodin. Pomocí FNCT, NCTL a nyní i SHT je také možné zjistit vliv anizotropie na odolnost HDPE geomembrán proti pomalému růstu trhliny, a to z toho důvodu, že vzorky vyražené z geomembrány v příčném směru vykazují menší hodnoty modulu deformačního zpevnění než vzorky, které byly vyražené v podélném směru geomembrány. Z praktického hlediska se zkouší ten směr, který je z hlediska životnosti kritický, a to směr kolmý na směr vytlačování. [36-39]

Výsledky testování byly vyhodnoceny a formulovány do norem. Pro NCTL se jedná o normy ASTM D 5397-99 a ČSN EN 14576, pro FNCT nese norma označení ISO 16770. Nejnověji byla zavedena norma SHT (ČSN ISO 18488), která byla publikována v roce 2018.

V dnešní době se přistupuje k hledání dalších testů, které by blíže specifikovaly vnitřní strukturu materiálu, a tím by korelaci poskytly spolehlivěji.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 POPIS EXPERIMENTU

Cílem praktické části bakalářské práce bylo připravit experimentální podklady pro systematické sledování a nalezení korelací mezi NCTL testem a SHT testem, a to pro nativní materiály, z nichž byly vyrobeny geomembrány. Za tímto účelem byly ve spolupráci Jutou a.s. připraveny 3 typy vzorků ve formě vytlačené folie a vzhledem k tomu, že v současné době firma nevlastní komoru umožňující provádět SHT test, bylo spolupracováno s ústavem ÚMCH AV ČR Praha a UNIPETROL RPA – odštěpný závod PIB, kde byly vlastní zkoušky provedeny.

7.1 Použité materiály

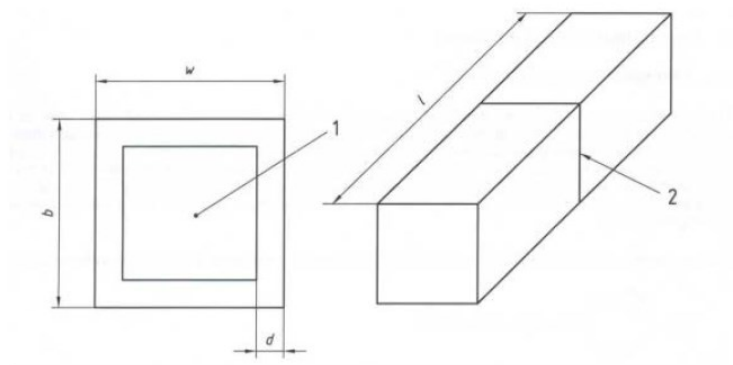
Pro posouzení modality a typu komonomeru byly zvoleny následující typy PE materiálů. Z produkce UNIPETROL byly použity 2 unimodální materiály s různým typem komonomeru (buten, hexen), a to Liten VL 20 (C4) a Liten VL 20 N (C6) a zahraniční bimodální oktenový materiál Dowlex 2342M (C8). Charakteristika těchto materiálů je blíže specifikována v materiálových listech, které jsou uvedeny v příloze 1, 2 a 3.

Pro experimentální část byla zvolena geomembrána Junifol HDPE o jmenovité tloušťce 2,0 mm.

7.2 Stanovení FNCT

7.2.1 Příprava a popis zkušebních těles

Příprava zkušebních těles je podrobně popsána v normě ISO 16770. V normě jsou uvedeny 3 typy zkušebních těles. Pro stanovení FNCT pro materiály, z nichž se vyrábějí geomembrány, se používá zkušební těleso ve tvaru hranolu. Zkušební tělesa se frézovala z polotovaru – lisované desky tloušťky 10 mm. Tato deska byla připravena technologií lisování s velmi pomalým chlazením. Z lisované desky se frézováním připravily zkušební tělesa ve tvaru hranolu (viz Obr. 22) o rozměrech 100x10x10 mm s obvodovým vrubem do hloubky 1,6 mm. Podrobný popis způsobu lisování i příprava zkušebních těles jsou uvedeny v příslušné normě.



Obr. 22: Zkušební těleso používané při FNCT testu

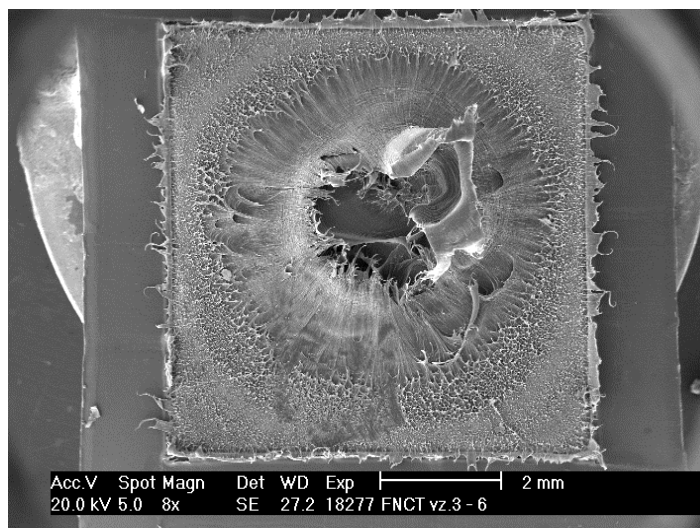
7.2.2 Použitá zařízení a podmínky zkoušky

Pro metodu FNCT se volí podmínky zkoušky: referenční napětí 4 MPa, teplota zkoušky 80 °C a jako detergent byl použit 2 % roztok Arcopalu N100 v destilované vodě. Vlastní zkouška byla realizována na zařízení FNCT, které je znázorněno na Obr. 23.



Obr. 23: Zkušební zařízení používané při testu FNCT v UNIPETROL RPA

Zkouška probíhala při dvou zkušebních napětích ležících nad referenčním napětím a při 2 napětích ležících pod referenčním napětím (3,25, 3,75, 4,25 a 4,75 MPa). Z výsledků zkoušky se stanoví čas do lomu odpovídající referenčnímu napětí 4 MPa. Po zkoušce byl stanoven skutečný zbytkový průřez (tzv. ligament), viz Obr. 24. Přesný postup je popsán v normě ČSN ISO 16770. Změřené a zprůměrované hodnoty pro dané typy materiálů stanovené pomocí FNCT testu jsou uvedeny v Tab. 1



Obr. 24: Skutečný zbytkový průřez

Tab. 1: Naměřené a zprůměrované hodnoty pro dané typy PE zkouškou FNCT

Typ HDPE	C4	C6	C8
Čas do lomu [hod]	164±0,7	359±0,7	648±0,7

7.2.3 Diskuze

Z naměřených hodnot lze konstatovat, že FNCT dobře rozliší jednotlivé typy PE, jak z hlediska modality, tak z hlediska typu komonomeru. Nejlepší odolnost proti pomalému šíření trhliny (SCG), jak jsme předpokládali, má bimodální materiál „oktenový“ typ Dowlex 2342M. Je obecně známo, že dlouhodobé zkoušky, tedy i zkouška FNCT, vykazuje poměrně velké rozptyly hodnot. Z tohoto důvodu byly v rámci projektu ISO realizovány rozsáhlé kruhové testy, které umožnily stanovit meze tohoto rozptylu, viz dodatek normy 16770.

7.3 Stanovení NCTL

7.3.1 Příprava a popis zkušebních těles

Zkušební tělesa pro zkoušku dle ASTM D 5397 - 99 byla připravena vysekáním z geomembrány v Jutě a.s. dle standardní raznice, viz Obr. 25a), a to pro každý materiál 6 ks zkušebních těles ve směru vytlačování (MD) a 6 ks zkušebních těles kolmo na směr vytlačování (CD). Stejně jako u metody FNCT se využívá testování pouze pro vzorky vyražené kolmo na směr vytlačování. Zkušební tělesa odpovídají tělesům, která jsou popsána v normě dle ČSN EN ISO 527-3 v BIP.

Takto připravená tělesa bez vrubu byla použita pro stanovení meze kluzu na trhačím stroji za nastavených podmínek: rychlost 50 mm/min a normální teplotě. Použité zařízení je znázorněno na Obr. 25b).



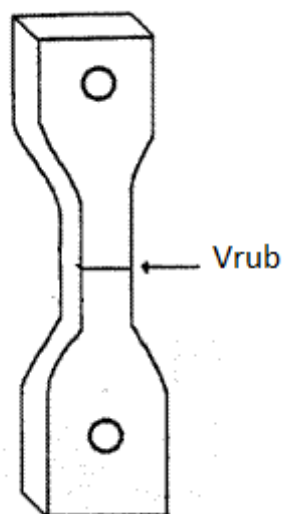
a)



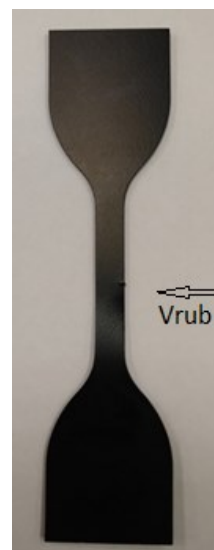
b)

Obr. 25: a) Zkušební tělesa používaná pro stanovení meze kluzu s raznicí, b) trhačí stroj pro stanovení meze kluzu

Pro zkoušku NCTL se použije hodnota 30 % meze kluzu zjištěná pomocí trhačího stroje. Pro metodu NCTL bylo zkušební těleso opatřeno postranním vrubem do hloubky 2 mm (20 % tloušťky tělesa), který lze vidět na Obr. 26. Pro zkoušku bylo použito 6 zkušebních těles, která byla orientovaná kolmo na směr vytlačování.



a)



b)

Obr. 26: a) Schéma zkušební tělesa pro zkoušku NCTL, b) skutečné zkušební těleso

7.3.2 Použitá zařízení

Vlastní zkouška probíhala dle postupu uvedeného v normě ASTM D 5397-99 (NCTL) na zařízení vlastní výroby, které splňuje podmínky normy ČSN ISO 16770. *Plastics - Determination of environmental stress cracking (ESC) of polyethylene (PE) - Full-notch creep test (FNCT)*.

7.3.3 Podmínky zkoušky a nastavení přístroje

Výše připravená zkušební tělesa se umístí do stejného zařízení jako pro zkoušky FNCT, vlastní zkouška probíhá dle dodatku normy NCTL (ASTM D 5397-99), tj. při jedné úrovni napětí, při teplotě 50 °C a v 10 % roztoku Igepalu 630 v destilované vodě.

Výsledkem zkoušky je počet hodin do lomu zkušebních těles nebo dle dodavatelsko-odběratelských vztahů je zkouška ukončena po požadovaném počtu uplynulých hodin. V tomto případě se jednalo o první případ ukončení zkoušky. Výsledky měření NCTL jsou uvedeny v následující Tab. 2

7.3.4 Výsledek zkoušky

Tab. 2: Naměřené a zprůměrované hodnoty pro dané typy PE zkouškou NCTL

Typ HDPE	C4	C6	C8
Čas do lomu [hod]	298±0,7	967±0,7	2500±0,7

7.3.5 Diskuze

Zkouška NCTL prokázala, obdobně jako FNCT zkouška, vliv modality a typu komonomerů. Dále nejlepší odolnost proti SCG má opět bimodální materiál Dowlex. Ve srovnání s FNCT jsou hodnoty výrazně vyšší, což je způsobeno jiným typem použitého zkušební tělesa, typem vrubu i podmínkami zkoušky. Nicméně pořadí odolnosti HDPE proti SCG zůstává zachováno.

7.4 Stanovení modulu deformačního zpevnění <Gp>

7.4.1 Příprava a popis zkušebních těles

Zkušební tělesa ve tvaru oboustranných lopatek byla vyseknuta z geomembrán na pracovišti firmy Juta a.s. Tvar zkušebních těles je stejný jako pro zkoušku NCTL, ale bez vrubu a jsou vyrobena podle normy ČSN EN ISO 527-3 (Zkušební tělesa pro zkoušku SHT).



Obr. 27: Zkušební tělesa pro zkoušku SHT

Pro každý typ HDPE bylo vytvořeno 10 zkušebních těles, konkrétně 5 těles v podélném směru a 5 v příčném směru. Pro urychlení se ale používají tělesa kolmá na směr vytlačování.

Tab. 3: Typické rozměry lopatek

Celková délka [mm]	60
Rozměr rozšířených konců [mm]	12,5
Šířka pracovní části [mm]	3
Tloušťka pracovní části [mm]	1,5

7.4.2 Použitá zařízení

Ke zkoušce byl použit přístroj pro statické tahové testy Instron 6025/5800R vybavený temperační komorou, snímačem zatížení, pneumatickými úchyty zkušebních těles a bezkontaktním videoextenzometrem.



Obr. 28: Temperační komora [40]

7.4.3 Podmínky zkoušky a nastavení přístroje

Stanovení modulu deformačního zpevnění probíhalo podle požadavků normy ČSN ISO 18488:2015 *Polyethylene (PE) materials for piping systems - Determination of Strain Hardening Modulus in relation to slow crack growth - Test method (SHT)*.

Tab. 4: Podmínky zkoušky SHT

Snímač zatížení [N]	100
Rychlost zatěžování [mm/min]	20
Teplota prostředí [°C]	80±1

7.4.4 Výsledek zkoušky

Tab. 5: Naměřené a zprůměrované hodnoty pro dané typy PE zkouškou SHT

Typ HDPE	C4	C6	C8
$\langle G_p \rangle$ [MPa]	48±0,7	79±0,7	158±0,7

7.4.5 Diskuze

Z provedeného testu vyplývá, že obdobně jako u FNCT a NCTL, že SHT test je schopen posoudit modalitu a vliv komonomeru na dobu životnosti, dále jak je patrné z tabulek, hodnoty směrodatných odchylek jsou výrazně nižší než u výše uvedených testů (FNCT, NCTL). Tato skutečnost potvrzuje obecný fakt, že u dlouhodobých zkoušek, kterými NCTL a FNCT vzhledem k SHT jsou, tyto zkoušky vykazují podstatně větší rozptyly, než zkoušky krátkodobé (SHT). Ve srovnání s NCTL, kde se čas do lomu pohybuje řádově ve stovkách až tisících hodin, byly výsledky SHT získány v průběhu 24 hodin.

7.5 Porovnání jednotlivých metod

Závěrem je uvedena souhrnná tabulka porovnávající výsledky jednotlivých testů.

Tab. 6: Shrnuté výsledky všech zkušebních metod pro dané typy PE

Metoda	Norma	Jednotky	Liten VL 20 (butenový typ)	Liten VL 20N (hexenový typ)	Dowlex 2342M (oktenový typ)
FNCT	ISO 16770	Čas do lomu [hod]	164±6,5	359±6,5	648±6,5
NCTL	ASTM D 5397-99, ČSN EN 12814-3	Čas do lomu [hod]	298±4,0	967±4,0	2500±4,0
SHT	ČSN ISO 18488	Modul def. zpevnění [MPa]	48±0,7	79±0,7	158±0,7

ZÁVĚR

Předložená bakalářská práce sleduje zadání bakalářské práce, která je zaměřena na korelace FNCT, NCTL a SHT u geomembrán. Byla vypracována rešerše zaměřená na stanovení životnosti geomembrán a nativních materiálů, z nichž se geomembrány standardně vyrábí. V první části je popsána výroba geomembrán ve firmě Juta a.s. spolu s charakteristikou vysoko-hustotního PE a lineárního nízko-hustotního PE, což jsou materiály nejčastěji používané na výrobu geomembrán. Životnost těchto geomembrán je ovlivněna mnoha parametry, z nichž ty nejvýznamnější (distribuce molekulových hmotností a typ komonomeru) jsou diskutovány v kapitole 3. Zvláštní pozornost byla v bakalářské práci věnována vymezení pojmu životnosti přes mezní stavy, z nichž největší roli hraje křehký lom po dlouhodobém namáhání probíhající mechanismem pomalého šíření trhliny (SCG), (viz kapitola 4) a zároveň se věnují metodám pro stanovení životnosti. Životnost geomembrán je testována pomocí dlouhodobých testů, konkrétně FNCT a NCTL využívajících pro zkrácení doby testování zkušební tělesa s vrubem, detergent nebo zvýšených teplot. Byla ale vyvinuta nová krátkodobá zkouška životnosti PE geomembrán (SHT), která je analyzována v kapitole 5. Mezi testy FNCT, NCTL a SHT je hledána korelace, která je posuzována v kapitole 6 a testována v experimentální části bakalářské práce.

V praktické části byly použity 3 typické granuláty používané pro výrobu geomembrán. Byly vybrány tak, aby bylo možné posoudit vliv základních molekulárních parametrů, kterými jsou modalita a použitý typ komonomeru, na životnost geomembrán. Pro experimentální část byly použity 2 urychlené testy stanovující životnost NCTL a FNCT a krátkodobý test SHT.

Z výsledků zkoušek vyplývá, že nejen modalita materiálu má zásadní vliv na životnost projevující se zvýšenými hodnotami času do lomu u zkoušek FNCT a NCTL, jakož i podstatně vyšší hodnotou modulu deformačního zpevnění získaného ze zkoušky SHT. Bylo prokázáno že butenové (C4) typy, oproti hexenovým (C6) a oktenovým (C8), vykazují nižší hodnoty životnosti, což bylo také prokázáno experimentem.

Dále bylo prokázáno, že dva unimodální materiály s podobnou distribucí molekulových hmotností se zásadně liší z pohledu životnosti z důvodu použitého typu komonomeru.

Ukazuje se, že metoda SHT je perspektivním testem pro rychlé odhady životnosti i pro nejnovější typy materiálů, nicméně není ještě shromážděno dostatečné množství statistických dat, aby bylo možné kvantifikovat rozdíly mezi hodnotou deformačního zpevnění

s časem do lomu jednotlivých materiálů. Na základě statistických dat bude snaha o přiřazení konkrétních hodnot NCTL k hodnotám SHT.

Platnost normy SHT pro geomembrány ČSN ISO 18488 je teprve od prosince 2018, což je krátká doba pro nashromáždění potřebných dat nutných ke korelacím s předešlými testy. Navíc norma posuzuje vlivy pouze pro nativní materiály s definovanou modalitou, také daným typem a obsahem komonomeru.

Aktuální celosvětový výzkum a vývoj na úrovni CEN a ISO je zaměřen na posuzování vztahu FNCT, NCTL a SHT na:

- Vliv počtu bočních větví na tisíc uhlíků (CH₃/1000C) pro nativní materiály
- Vliv směsování materiálů – podíl typu komonomeru
- vliv zabudování regranulátů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [2] *Juta a.s.* [online]. [cit. 2018-11-02]. Dostupné z: <http://www.juta.cz/Home.html>
- [2] *Juta.cz* [online]. [cit. 2018-11-02]. Dostupné z: <http://www.juta.cz/obecne/o-spolecnosti.html>
- [3] *Historie firmy Juta a.s.* [online]. [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: <http://www.juta.cz/obecne-informace.html>
- [4] HORROCKS, A. R., S. ANAND. *Handbook of technical textiles*. Boca Raton, FL: CRC Press/Woodhead Pub., 2000 [cit. 2018-11-15]. ISBN 08-493-1047-4. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHTT00001/handbook-technical-textiles/handbook-technical-textiles>
- [5] DAS, B. M. *Geotechnical engineering handbook* [online]. Ft. Lauderdale, FL: J. Ross Pub., 2011 [cit. 2018-11-15]. ISBN 978-1-932159-83-7. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00C815R3/geotechnical-engineering/geoenviron-introduction>
- [6] Folie Junifol. *Juta a.s.* [online]. [cit. 2018-11-11]. Dostupné z: <http://www.juta.cz/vyrobní-programy/geosyntetika/vyrobky/junifol.html>
- [7] Juta, interní materiály
- [8] DUCHÁČEK, V. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití* [online]. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006 [cit. 2019-05-15]. ISBN 80-7080-617-6. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-617-6/pages-img/anotace.html
- [9] NEZBEDOVÁ, E. *Polymerní materiály – Struktura, vlastnosti, aplikace. Prezentace*. 2013.
- [10] MLEZIVA, J. Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. Praha: Sobotáles, 1993, s. 20-39. ISBN 80-901570-4-1.
- [11] ZÁMORSKÝ, Z. *Nauka o polymerech II*. 1980, s. 29-40.
- [12] NAVRÁTILOVÁ, J. Přednášky z předmětu „Makromolekulární chemie II“, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2018
- [13] PŘIKRYLOVÁ, J. *Aplikační potenciál LDPE, LLDPE, HDPE a jejich směsí*. 2017. Bakalářská práce. FT UTB ve Zlíně
- [14] TOMIS, F. *Makromolekulární látky: Polyethylén*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1961.

- [15] ELSEVIER, W. A. *Applied plastics engineering handbook: processing and materials* [online]. Boston, 2011, s. 28 [cit. 2018-12-26]. ISBN 978-1-4377-3515-4. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0098QIA2/applied-plastics-engineering/high-density-polyethylene>
- [16] LAGARÓN, J. M. *Multifunctional and Nanoreinforced Polymers for Food Packaging* [online]. Woodhead Publishing, 2011, s. 200 [cit. 2018-12-22]. ISBN 978-1-84569-738-9. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMNPFP003/multifunctional-nanoreinforced/multifunctional-nanoreinforced>
- [17] MURALISRINIVASA, M. S. *Polymer blends and composites: chemistry and technology* [online]. Beverly, Massachusetts: Scrivener Publishing, 2017, s. 20-21 [cit. 2018-12-26]. ISBN 978-1-118-11889-4. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011HGVY1/polymer-blends-composites/linear-low-density-polyethylene>
- [18] FARMER, N. *Trends in packaging of food, beverages and other fast-moving consumer goods (FMCG): markets, materials and technologies* [online]. Oxford: Woodhead Publishing, 2013, s. 60-61 [cit. 2018-12-26]. Woodhead Publishing series in food science, technology and nutrition. ISBN 978-0-85709-503-9. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00C5MGS1/trends-in-packaging-food/polypropylene-pp>
- [19] *Petroleum.cz* [online]. [cit. 2019-01-26]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/vyrobky/ldpe.aspx>
- [20] NEZBEDOVÁ, E. *Mechanismy porušování trubkových typů HDPE*. Brno: VUTIUM, 2009. Habilitační práce. FCH VUT v Brně. ISBN 978-80-214-3916-0
- [21] FIEDLER, L. *Lomové chování trubkových polyolefinů*. Brno, 2011. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/6286>
- [22] CHENG, X. a H. ZHANG. Polymer testing. *Polymer Testing*. 2018. Amsterdam: Elsevier Ltd, s. 213-217. ISBN 0142-9418. ISSN 0142-9418
- [23] NEZBEDOVÁ, E.: Hodnocení životnosti plynovodu z HDPE materiálu. *Slovgas*, 4, 2005
- [24] POKLUDA, J., F. KROUPA a L. OBDRŽÁLEK. *Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek: (kovy, keramika, plasty)* [online]. Brno: PC-DIR, 1994, s. 363-371 [cit. 2019-

- 02-26]. ISBN 80-214-0575-9. Dostupné z: http://physics.fme.vutbr.cz/~mcerny/vyuka/Mech_vlast_300dpi.pdf
- [25] HICKS, J. G. *Welded joint design*. 2nd ed. Boston: BSP Professional Books, 1987. ISBN 06-320-1874-7.
- [26] ROPEK, L. *Moderní metody hodnocení polymerů*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=55343
- [27] ŠTOLFOVÁ, K. *Vliv detergentů na urychlení testů životnosti u PE trubkových materiálů*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/41481>
- [28] NEZBEDOVÁ, E., P. HUTAŘ, M. ZOUHAR, Z. KNĚSL, J. SADÍLEK a L. NÁHLÍK. The applicability of the Pennsylvania Notch Test for a new generation of PE pipe grades. *Polymer Testing*. 2013, **32**(1), 106-114. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2012.09.009. ISSN 01429418.
- [29] ROBLEDO, N., C. DOMÍNGUEZ, R. A. GARCÍA-MUÑOZ. Alternative accelerated and short-term methods for evaluating slow crack growth in polyethylene resins with high crack resistance. *Polymer Testing* [online]. 2017, **62**, 366-372 [cit. 2019-03-15]. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2017.07.022. ISSN 01429418. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142941817307936>
- [30] SCHILLING, M., U. NIEBERGALL a M. BÖHNING. Full notch creep test (FNCT) of HDPE – Characterization and differentiation of brittle and ductile fracture behavior during environmental stress cracking (ESC). *Polymer Testing* [online]. 2017, **64**, 156-166 [cit. 2019-03-15]. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2017.09.043. ISSN 01429418. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S014294181731156X>
- [31] GRELLMANN, W., B. LANGER. *Deformation and fracture behaviour of polymer materials* [online]. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017, s. 179 [cit. 2019-03-22]. ISBN 978-3-319-41877-3.
- [32] ISO 16770. *Plastics — Determination of environmental stress cracking (ESC) of polyethylene — Full-notch creep test (FNCT)*. 2018.
- [33] HSUAN, Y.G. a R.M. KOERNER. The Single Point-Notched Constant Load Test: A Quality Control Test for Assessing Stress Crack Resistance. *Geosynthetics International*

[online]. 1995, 1986, 2(5), 831-843 [cit. 2019-03-25]. DOI: 10.1680/gein.2.0038. ISSN 1072-6349. Dostupné z: <http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/gein.2.0038>.

[34] ASTM D 5397-99. *Standart test method for evaluation of stress crack resistance of polyolefin geomembranes using notched constant tensile load test*.

[35] ISO 18488. *Polyethylene (PE) materials for piping systems — Determination of Strain Hardening Modulus in relation to slow crack growth — Test method*. 2015.

[36] ZAZINGER, H. Determination of the Stress Cracking Resistance of HDPE Geomembranes by using Accelerated Test Methods. In: *Geosynthetics 2015* [online]. 2015, 2015 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/297756915_Determination_of_the_Stress_Cracking_Resistance_of_HDPE_Geomembranes_by_using_Accelerated_Test_Methods

[37] ZAZINGER, H. A new accelerated test method for stress crack resistance of HDPE geomembranes. In: *GeoAmericas 2012* [online]. 2012 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/297731785_A_new_accelerated_test_method_for_stress_crack_resistance_of_HDPE_geomembranes?fbclid=IwAR2kwmSDsA0Cywi_gqrZI3AcgnqeZGq0w-G_0XH5IRc4VQhDi23wDauZ7co

[38] ZAZINGER, H. Evaluation of the stress cracking resistance of exposed geomembranes. In: *6th International Conference Geosynthetics Middle East* [online]. 2013 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/305723264_Evaluation_of_the_stress_cracking_resistance_of_exposed_geomembranes

[39] VAN BEEK, D. J. M. *Strain hardening: An elegant and fast method to predict the slow crack growth behavior of HDPE pipe materials* [online]. In: VAN BEEK, D. J. M. 2011 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/287430880_Strain_hardening_An_elegant_and_fast_method_to_predict_the_slow_crack_growth_behavior_of_HDPE_pipe_materials

[40] *Instron.us: Environmental Chambers* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.instron.us/en-us/testing-solutions/by-standard/astm/single-testing-solutions/astm-d5766?region=North%20America>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid
HDPE	Vysoko-hustotní polyethylen
LDPE	Nízko-hustotní polyethylen
LLDPE	Lineární nízko-hustotní polyethylen
UHMW-PE	Polyethylen o velmi vysoké molekulární hmotnosti
PS	Polystyren
PA	Polyamid
OIT	Indukční doba oxidace
T_m	Teplota tání
T_f	Teplota tečení
SCG	Pomalé šíření trhliny
RPC	Rychlé šíření trhliny
GPC	Gelová permeační chromatografie
CTOD	Otevření trhliny
t_i	Čas potřebný pro iniciaci trhliny
$d(\text{COD})/dt$	Rychlost pomalého šíření trhliny (SCG)
t_f	Čas selhání materiálu
σ_L	Aplikované napětí
l	Vzdálenost mezi značkami zkušebního tělesa
l_0	Standardní délka zkušebního tělesa
Δl	Nárůst délky zkušebního tělesa
M	Hmotnost závaží

A_L	Průřez tělesa
R	Poměr ramen
W	Šířka zkušebního tělesa
T	Tloušťka vzorku
MA	Pákový převod
F	Naměřená síla
A	Průřez zkušebního tělesa
λ	Dlouhíci poměr
<Gp>	Modul deformačního zpevnění
c	Matematický parametr konstitučního modelu
MD	Vzorky vyražené ve směru vytlačování
CD	Vzorky vyražené ve směru kolmém na směr vytlačování
kg	Kilogram
MPa	Megapascal
N/mm^2	Newton na milimetr čtverečí
%	Procento
°C	Stupeň Celsia
mm	Milimetr
hod	Hodina

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Rozmístění závodů Juta a.s. v České republice.....	13
Obr. 2: Dávkovací šachty + extruze.....	15
Obr. 3: Detail ploché vytlačovací hlavy	16
Obr. 4: Víceválec	17
Obr. 5: Výsledný produkt – geomembrána.....	17
Obr. 6: Vztah mezi strukturou, morfologií a lomovým chováním [20].....	21
Obr. 7: Záznam z gelové permeační chromatografie (GPC) pro unimodální typ HDPE [21].....	23
Obr. 8: Záznam z gelové permeační chromatografie (GPC) pro bimodální typ HDPE [21].....	23
Obr. 9: Závislost napětí na čase do lomu [21]	24
Obr. 10: Iniclace a růst trhliny v krezju, a) poškození v okamžiku vložení žiletky, b) po odstranění žiletky, c) po částečném zatížení, d) po úplném zatížení, e) iniclace trhliny, f) růst trhliny [27].....	25
Obr. 11: Rozplétání „tie“ molekul ve fibrilách [21]	26
Obr. 12: Zkušební těleso (a), závislost CTOD na čase (b) [21].....	29
Obr. 13: Zkušební těleso [21]	30
Obr. 14: Schéma zkušebního zařízení pro zkoušku FNCT [21].....	30
Obr. 15: Zkušební těleso pro NCTL s definovaným vrubem [33].....	31
Obr. 16: Závislost aplikované meze kluzu na čase do lomu [34].....	32
Obr. 17: Schéma zkušebního zařízení pro zkoušku NCTL [33].....	33
Obr. 18: Závislost napětí na deformaci [35],	34
Obr. 19: Zkušební vzorek [35].....	34
Obr. 20: Závislost času do lomu FNCT stanovený metodou modulu deformačního zpevnění [37].....	37
Obr. 21: Závislost doby porušení materiálu metodou SP-NCTL na modulu deformačního zpevnění [36].....	37
Obr. 22: Zkušební těleso používané při FNCT testu	41
Obr. 23: Zkušební zařízení používané při testu FNCT v UNIPETROL RPA	41
Obr. 24: Skutečný zbytkový průřez	42
Obr. 25: a) Zkušební tělesa používaná pro stanovení meze kluzu s raznicí, b) trhací stroj pro stanovení meze kluzu.....	43

Obr. 26: a) Schéma zkušebního tělesa pro zkoušku NCTL, b) skutečné zkušební těleso.....	44
Obr. 27: Zkušební tělesa pro zkoušku SHT	45
Obr. 28: Temperační komora [40]	46

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Naměřené a zprůměrované hodnoty pro dané typy PE zkouškou FNCT.....	42
Tab. 2: Naměřené a zprůměrované hodnoty pro dané typy PE zkouškou NCTL	45
Tab. 3: Typické rozměry lopatek	46
Tab. 4: Podmínky zkoušky SHT	46
Tab. 5: Naměřené a zprůměrované hodnoty pro dané typy PE zkouškou SHT	47
Tab. 6: Shrnuté výsledky všech zkušebních metod pro dané typy PE	47

SEZNAM PŘÍLOH

Materiálový list pro PE LITEN VL 20 N.....	60
Materiálový list pro PE LITEN VL 20.....	61
Materiálový list pro Dowlex 2342M.....	62

PŘÍLOHA I. MATERIÁLOVÝ LIST PRO PE LITEN VL 20 N

PE LITEN™ VL 20 N

PŘEDBĚŽNÁ MATERIÁLOVÁ SPECIFIKACE

PND 33-300 Lineární polyetylen LITEN - Část 2

SKP 24.16.51

PE-HD PRO VYTLAČOVÁNÍ

Charakteristika

LITEN VL 20 N je přírodní kopolymer s širokou distribucí molekulových hmotností, určený pro zpracování vytlačováním. Typickou aplikací je výroba geomembrán.

Zdravotní nezávadnost

LITEN VL 20 N splňuje požadavky vyhlášky MZ ČR č. 38/2001 Sb., v platném znění, O hygienických požadavcích na výrobky určené pro styk s potravinami a pokrmami. Typ splňuje rovněž požadavky Nařízení Evropského Parlamentu a Rady (ES) č. 1935/2004 a Nařízení Komise (EU) č. 10/2011, v platném znění.

Hořlavost dle ČSN EN 13501-1: třída F

Mezinárodní označení ISO 17855-PE-MD,E,38-T006

ZARUČOVANÉ JAKOSTNÍ PARAMETRY

Parametr	Jednotka	Hodnota	Zkušební metoda
Index toku taveniny (190 °C/2,16 kg)	g/10 min	0,13 - 0,18	ČSN EN ISO 1133-1
Index toku taveniny (190 °C/5 kg)	g/10 min	0,7 - 0,9	
Poměr indexů toku taveniny (21,6 kg/2,16 kg)	-	100 - 150	
Hustota (23 ± 0,1) °C	kg/m ³	935 - 940	ČSN EN ISO 1183-2
Obsah těkavých látek	%	<0,1	ČSN EN ISO 1269
Napětí na mezi kluzu v tahu	MPa	18*	ČSN EN ISO 527-1,2
Modul pružnosti v ohybu	MPa	650*	ČSN EN ISO 178
Vrbová houževnatost Charpy při 23 °C při -30 °C	kJ/m ²	15* 4*	ČSN EN ISO 179-1
Teplota měknutí dle Vicata (50 °C/h; 10 N)	°C	115*	ČSN EN ISO 306
Termooxidační stabilita OIT (210 °C)	min	60*	ISO 11357-6
Odolnost proti korozi za napětí F ₅₀ (50 °C; 100 %)	h	>1000	ASTM D 1693
Odolnost proti korozi za napětí FNCT (4 MPa; 80°C)	h	300*	ISO 16770

* informativní hodnota

Vydal: Odbor Product Intelligence - polyolefiny

tel.: 476 162 912

Nahrazuje vydání z 20. 2. 2016

Platnost od 28. 3.2018

PŘÍLOHA II. MATERIÁLOVÝ LIST PRO PE LITEN VL 20

PE-HD LITEN® VL 20

TECHNICKÝ LIST

PE-HD PRO VYTLAČOVÁNÍ

MFR (190/5): 0,7 g/10 min

Liten VL 20 je vysokohustotní polyetylen vyráběný v Unipetrolu RPA technologií UNIPOL.

Charakteristika

- C4 - kopolymer
- černý granulát
- UV stabilizace
- vynikající odolnost proti korozi za napětí

Mezinárodní označení

ISO 17855-PE-HD,B,50-T006

Aplikace

- trubky pro netlakové aplikace
- desky
- skládkové folie

Materiálové vlastnosti (typické hodnoty, netvoří specifikaci daného typu)

Parametr	Zkušební metoda	Jednotka	Hodnota	
REOLOGICKÉ VLASTNOSTI				
Index toku taveniny (190 °C/2,16 kg)	ISO 1133-1	g/10 min	0,12	
Index toku taveniny (190 °C/5 kg)		g/10 min	0,70	
Index toku taveniny (190 °C/21,6 kg)		g/10 min	16	
Poměr indexů toku taveniny 21,6/2,16		-	130	
MECHANICKÉ VLASTNOSTI				
Modul pružnosti v ohybu	ISO 178	MPa	750	
Modul pružnosti v tahu	ISO 527-1,2	MPa	650	
Napětí na mezi kluzu		MPa	19	
Prodloužení na mezi kluzu		%	7	
Křipový modul v tahu	ISO 899-1	MPa	1 h	406
			1000 h	210
Vrubová houževnatost Charpy	ISO 179-1	kJ/m ²	23 °C	13
			-30 °C	4
TEPELNÉ VLASTNOSTI				
Teplota tání (DSC)	ISO 11357-1, 3	°C	126	
Teplota měknutí dle Vicata (VST)	ISO 306	°C	114	
HDT (1,8 MPa)	ISO 75-1,2	°C	47	
OSTATNÍ VLASTNOSTI				
Hustota (23±1) °C	ISO 1183-2	kg/m ³	950	
ESCR, F ₅₀ (100 %)	ASTM D1693	h	>2000	
FNCT (80 °C, 4 MPa, 2 %)	ISO 16770	h	60	
Tvrdość Shore D	ISO 868	-	56	

Zpracovatelské podmínky

Parametr	Doporučená hodnota	Jednotka
Teplota taveniny	180 - 220	°C
Délka šneku	min. 21 d*	-

* Průměr šneku



PŘÍLOHA III: MATERIÁLOVÝ LIST PRO DOWLEX 2342M

Technical Information



DOWLEX™ 2342M Polyethylene Resin

Overview

DOWLEX™ 2342M Polyethylene Resin is a high density ethylene/octene copolymer resin. It has a unique molecular structure with a linear polyethylene backbone and controlled octene side branches, which provides a combination of flexibility with very high toughness and stress crack resistance. A specified carbon black masterbatch is incorporated into the DOWLEX 2342M Polyethylene Resin during extrusion to arrive at a fully stabilised, homogeneous black sheet with excellent weldability. Sheetting thus produced meets the requirements of the Guidelines and Directives controlling general water barrier membranes such as the North Rhine Westfalia Guidelines or "Guideline for Plastic Membranes in Landfill sites" issued 7/92 from B.A.M. Berlin.

Processability: Typical extrusion temperature range for DOWLEX 2342M Polyethylene Resin is 190 to 230 °C. The resin contains processing stabilisers compatible with those in the Masterbatch added to guarantee short and long term processing, thermal and environmental stability including metal deactivators.

Applications:

- Heavy sheeting.
- General water barrier membranes.

Additive • Antiblock: No • Slip: No • Processing Aid: No

Physical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Density			ISO 1183
–	0.932 g/cm ³	0.932 g/cm ³	
– ₁	0.944 g/cm ³	0.944 g/cm ³	
Melt Index			ISO 1133
190°C/2.16 kg	0.85 g/10 min	0.85 g/10 min	
190°C/5.0 kg	2.6 g/10 min	2.6 g/10 min	
Environmental Stress-Cracking Resistance			ASTM D1693A
68°F (20°C), 0.0787 in (2.00 mm), 10% AntaroX, Compression Molded	> 15000 hr	> 15000 hr	

Mechanical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Tensile Stress			
Yield ¹	2610 psi	18.0 MPa	ISO 527-2
Yield, 0.0787 in (2.00 mm), Compression Molded ²	2320 psi	16.0 MPa	ISO 527-2/50
Break ¹	> 4350 psi	> 30.0 MPa	ISO 527-2
Break, 0.0787 in (2.00 mm), Compression Molded ²	> 4350 psi	> 30.0 MPa	ISO 527-2/50
Tensile Strain			
Yield ¹	12 %	12 %	ISO 527-2
Yield, 0.0787 in (2.00 mm), Compression Molded ²	14 %	14 %	ISO 527-2/50
Break ¹	> 800 %	> 800 %	ISO 527-2
Break, 0.0787 in (2.00 mm), Compression Molded ²	> 800 %	> 800 %	ISO 527-2/50
Flexural Modulus - 2% Secant			ISO 178
0.0787 in (2.00 mm), Compression Molded	79800 psi	550 MPa	
Tear Resistance ¹	> 750 N	> 750 N	DIN 53356
Films	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Film Puncture Force ¹	> 1690 lbf	> 7500 N	DIN 54307
Impact	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Notched Izod Impact Strength ³			ISO 180
-40°F (-40°C), Compression Molded	31 ft-lb/in ²	65 kJ/m ²	
73°F (23°C), Compression Molded	No Break	No Break	

Hardness	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Shore Hardness			ISO 868
Shore D, 0.0787 in (2.00 mm), Compression Molded	55	55	
Thermal	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Vicat Softening Temperature	243 °F	117 °C	ISO 306/A120
Oxidation Induction Time (410°F (210°C))	> 30 min	> 30 min	DIN EN 728

Notes

These are typical properties only and are not to be construed as specifications. Users should confirm results by their own tests.

¹ Black 2.5 mm thick sheet extruded from DOWLEX 2342M Polyethylene resin with a specified masterbatch conforming to DIN 16776 as: "PE, EACK 35T022 or D006". Carbon black content: 2.0-2.2%.

² Data are valid for MD and CD direction.

³ 2 mm thick