

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra technologických zařízení staveb**



## **Diplomová práce**

**Analýza spolehlivosti a životnosti SSD disků**

**Bc. Martin Sládek**

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Martin Sládek

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

**Analýza spolehlivosti a životnosti SSD disků**

Název anglicky

**SSD reliability and durability analysis**

---

### Cíle práce

Cílem práce bude analyzovat a specifikovat jednotlivé typy SSD disků včetně hybridních, popsat fyzikální podstatu funkce a na základě těchto podkladů stanovit optimální použití. V praktické části bude provedeno dlouhodobé testování SSD disků pro různé režimy nasazení v běžném PC. V závěru práce student definuje doporučení pro provoz a nasazení těchto disků.

### Metodika

1. Úvod
2. Cíl práce
3. Teoretický rozbor
4. Metodika
5. Testování a vyhodnocení
6. Ekonomické zhodnocení
7. Závěr a doporučení

**Doporučený rozsah práce**

50 – 60 stránek včetně obrázků a grafů

**Klíčová slova**

HW, SSD, spolehlivost, bezpečnost

---

**Doporučené zdroje informací**

- DEMBOWSKI, K. *Mistrovství v hardware*. Brno: Computer Press, 2009. ISBN 978-80-251-2310-2.
- ENGLANDER, I. *The architecture of computer hardware and systems software : an information technology approach*. New York: Wiley, 2003. ISBN 0471073253.
- HORÁK, J. *Hardware*. Brno: Computer Press, 1998. ISBN 80-7226-125-8.
- HORÁK, J. *Hardware : učebnice pro pokročilé*. Brno: Computer Press, 2004. ISBN 80-251-0234-3.
- internet a firemní zdroje
- MINASI, M. – ČERNÝ, J. – LOSÍK, V. – BARTOŇ, M. *Velký průvodce hardwarem*. Praha: Grada, 2002. ISBN 80-247-0273-8.
- PATTERSON, D A. – HENNESSY, J L. *Computer organization and design : the hardware/software interface*. San Francisco, Calif.: Elsevier Science [distributor], 2007. ISBN 978-0-12-370606-5.
- TAYLOR, J. *Managing information technology projects : applying project management strategies to software, hardware, and integration initiatives*. New York: Amacom, 2004. ISBN 978-0814408117.
- 

**Předběžný termín obhajoby**

2020/2021 LS – TF

**Vedoucí práce**

Ing. Zdeněk Votruba, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra technologických zařízení staveb

Elektronicky schváleno dne 3. 3. 2020

**doc. Ing. Jan Malaták, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 11. 05. 2021

---

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma: Analýza spolehlivosti a životnosti SSD disků, vypracoval samostatně pod vedením Ing. Zdeňka Votruby, Ph.D. a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Jsem si vědom, že moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne: .....

.....  
Bc. Martin Sládek

## **Poděkování**

Moc rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé práce, panu Ing. Zdeňku Votrubovi, Ph.D., za velice vstřícnou, přátelskou a odbornou pomoc při jejím zpracování.

## **Analýza spolehlivosti a životnosti SSD disků**

### **Abstrakt:**

Tato diplomová práce analyzuje problematiku SSD disků, které při srovnání se svými předchůdci nabízí razantní výkonnostní skok, ale potenciálně limitující životnost. Cílem je popsat fyzikální principy a funkce datových úložišť a poukázat na jejich klady a zápory v různých způsobech využití. Prakticky pak demonstrovat výkonnostní převahu SSD, nad pevnými disky a potenciálně vyvrátit obavy z jejich omezené životnosti.

**Klíčová slova: SSD, HDD, HW, flash paměť, 3D XPoint, spolehlivost, životnost**

## **SSD reliability and durability analysis**

### **Abstract:**

This thesis analyzes the issue of Solid State Drives, which compared to their predecessors offers a significant performance advantage, but potentially limiting lifespan. The aim is to describe the physical principles and functions of data stores and to point out their pros and cons in different uses. In practice demonstrate the performance superiority of SSDs over hard drives and potentially refutes concerns about their limited lifespan.

**Keywords: SSD, HDD, HW, flash memory, 3D XPoint, reliability, durability**

# Obsah

Seznam obrázků .....	1
Seznam tabulek .....	2
Seznam zkratk .....	3
1. Úvod .....	5
2. Cíl práce .....	6
3. Metodika práce .....	6
4. Počítačová paměť .....	7
4.1. Vnitřní paměť .....	8
4.1.1. Operační paměť .....	8
4.1.2. Paměť Cache .....	9
4.2. Vnější paměť .....	11
4.2.1. Magnetická paměť .....	12
4.2.2. 3D XPoint .....	15
4.2.3. Flash paměť .....	18
5. SSD .....	26
5.1. Druhy formátů .....	26
5.2. Rozhraní .....	27
5.3. Řadič .....	33
5.4. SSHD .....	39
6. Praktická část .....	40
6.1. Testovací sestava .....	40
6.2. Vybrané modely SSD disků .....	41
6.3. Metodika testování .....	44
6.3.1. Zadávané a měřené parametry .....	45
6.4. Testování .....	47
6.4.1. Syntetické testy .....	47
6.4.2. Uživatelské testy .....	60
6.4.3. Dlouhodobé zatěžování .....	64
6.5. Ekonomické zhodnocení .....	73
7. Závěr .....	78
Seznam použitých zdrojů .....	79
Příloha 1: Výstupní data z dlouhodobého zatěžování .....	90

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Proces načítání dat skrze paměť Cache, zdroj: vlastní na základě [1].....	9
Obrázek 2: Rozmístění jednotlivých úrovní Cache paměti v procesoru , zdroj: vlastní na základě [7].....	11
Obrázek 3: Části pevného disku a) deska s elektronikou, b) celkový pohled [8].....	12
Obrázek 4: Schématické zobrazení ploten HDD a) pohled z boku, b) pohled shora, zdroj: vlastní na základě [1] [10].....	12
Obrázek 5: Způsob čtení dat z HDD, zdroj: vlastní na základě [9].....	13
Obrázek 6: Schématické zobrazení paměti 3D XPoint, zdroj: vlastní na základě [15].....	15
Obrázek 7: Proces zápisu, přepisu a čtení paměti typu PRAM, zdroj: vlastní na základě [15]	16
Obrázek 8: Porovnání paměťových struktur NOR a NAND, zdroj: vlastní na základě [21] [22] .....	18
Obrázek 9: Paměťová buňka NAND – Tranzistor MOSFET s plovoucím hradlem , zdroj: vlastní na základě [22].....	19
Obrázek 10: Voltampérová charakteristika paměťové buňky, zdroj: vlastní na základě [22] .	19
Obrázek 11: Vývoj prahových napětí při rostoucím počtu P/E cyklů [91] .....	20
Obrázek 12: Porovnání jednotlivých druhů paměťových buněk [93] .....	21
Obrázek 13: Vývoj v udávané životnosti SSD disků [92].....	22
Obrázek 14: Rozdíl v rozložení paměťových buněk u planární a 3D technologie [31] .....	23
Obrázek 15: Struktura pětivrstvé 3D flash paměti, zdroj: vlastní na základě [32].....	24
Obrázek 16: Princip programování buněk 3D flash paměti [32].....	25
Obrázek 17: Nabídka různých formátů SSD disků Samsung, zdroj: vlastní na základě [66] [67] [68].....	26
Obrázek 18: a) Datový SATA kabel, b) Datový konektor SATA [47] [48] .....	28
Obrázek 19: a) Napájecí SATA kabel, b) Napájecí a datový konektor SATA na 2,5" zařízení [49] [50].....	29
Obrázek 20: AIC rozšiřující karta pro formát M.2 do slotu PCI-Express [55] .....	30
Obrázek 21: Ukázka rozdílných velikostí M.2 SSD disků [58] .....	31
Obrázek 22: Klíče používané pro M.2 SSD disky [60] .....	31
Obrázek 23: Rozložení prvků 2,5" SSD disku [70].....	33
Obrázek 24: Struktura SSD disku [73] .....	34
Obrázek 25: Popis algoritmu Garbage Collection, zdroj: vlastní na základě [79] .....	36
Obrázek 26: Popis funkce příkazu Trim, zdroj: vlastní na základě [79] .....	38
Obrázek 27: SSHD disk a) pohled po odstranění krytu, b) deska plošného spoje [90].....	39
Obrázek 28: Pořízené SSD disky, včetně nezbytného příslušenství .....	41
Obrázek 29: Rozbalené modely SSD disků.....	42
Obrázek 30: Umístění SSD disků do počítačové skříně a) připojení, b) náhled montáže do rámečku .....	44
Obrázek 31: Program CrystalDiskMark - Možnosti volby parametrů testu.....	45
Obrázek 32: Měření rychlosti čtení v programu CrystalDiskMark s prostorem 1 GiB .....	47
Obrázek 33: Měření rychlosti zápisu v programu CrystalDiskMark s prostorem 1 GiB .....	48
Obrázek 34: Měření rychlosti čtení v programu CrystalDiskMark s prostorem 32 GiB .....	49
Obrázek 35: Měření rychlosti zápisu v programu CrystalDiskMark s prostorem 32 GiB .....	50
Obrázek 36: Měření počtu operací za sekundu v programu AS SSD Benchmark .....	51
Obrázek 37: Měření přístupové doby v programu AS SSD Benchmark.....	52
Obrázek 38: Měření rychlosti sekvenčního čtení v programu ATTO Disk Benchmark .....	53
Obrázek 39: Měření rychlosti sekvenčního zápisu v programu ATTO Disk Benchmark.....	54
Obrázek 40: Komplexní měření všech parametrů při čtení v programu Anvil's Storage Utilities .....	55



Obrázek 41: Komplexní měření všech parametrů při zápisu v programu Anvil's Storage Utilities .....	56
Obrázek 42: Měření rychlosti zápisu v celém rozsahu kapacity disků v programu HD Tune Pro .....	57
Obrázek 43: Porovnání nejvyšších naměřených hodnot s hodnotami udávanými výrobcí .....	59
Obrázek 44: Porovnání provozních teplot jednotlivých SSD disků .....	60
Obrázek 45: Metodika měření času načítání her .....	62
Obrázek 46: Porovnání rychlosti načítání her mezi SSD a HDD .....	63
Obrázek 47: Náhled uživatelského prostředí funkce SSD Endurance, programu Anvil's Storage Utilities .....	64
Obrázek 48: Průběh dlouhodobého testu životnosti SSD disků .....	66
Obrázek 49: Informace zjištěné pomocí funkce S.M.A.R.T. programem CrystalDiskInfo .....	68
Obrázek 50: Rozdíl výkonu použitých SSD disků oproti referenčním hodnotám .....	71
Obrázek 51: Závěrečná kontrola sektorů pomocí funkce Error Scan programu HD Tune Pro .....	72
Obrázek 52: Vývoj ceny za gigabajt SSD a pevných disků [98].....	73
Obrázek 53: Srovnání vývoje průměrné ceny SATA a NVMe SSD [100] .....	74
Obrázek 54: Prodeje SSD a HDD disků v milionech kusů mezi lety 2015-2021 [101].....	76

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání jednotlivých typů paměti dle přístupové doby [1] .....	7
Tabulka 2: Porovnání kapacit jednotlivých úrovní Cache paměti vybraných modelů procesorů [6].....	10
Tabulka 3: Popis funkcí jednotlivých pinů datového konektoru SATA [45].....	28
Tabulka 4: Popis funkcí jednotlivých pinů napájecího konektoru SATA [45] .....	29
Tabulka 5: Přehled všech klíčů konektoru M.2 [61] .....	32
Tabulka 6: Výrobci a) SSD disků, b) řadičů, C) paměťových čipů [83] [84] [85] .....	37
Tabulka 7: Výpis komponentů testovací sestavy .....	40
Tabulka 8: Výrobci udávané parametry zvolených modelů SSD disků [31] [56] [105] [106] [107] [108].....	43
Tabulka 9: Shrnutí měření rychlosti zápisu a velikosti SLC Cache .....	58
Tabulka 10: Shrnutí celkových dat dlouhodobého zatěžování .....	67
Tabulka 11: Přehled odovídací dosažené výdrže SSD disků, dle hodnoty denního zápisu dat .....	69
Tabulka 12: Srovnání aktuálních cen za gigabajt kapacity paměťových úložišť [99] .....	75

## Seznam zkratek

AHCI .....	Advanced Host Controller Interface
AIC .....	Add-in Card
ARM .....	Advanced RISC Machines
ATA .....	Advanced Technology Attachment
BiSC .....	Bit Cost Scaling
CMOS .....	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
CPU .....	Central Processing Unit
CTF .....	Charge Trap Flash
DDR .....	Double Data Rate
DP .....	DisplayPort
DRAM .....	Dynamic Random Access Memory
DVD .....	Digital Versatile Disc
EB .....	ExaByte
ECC .....	Error Correction Code
EEPROM .....	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
FMI .....	Future Memory Interface
FTL .....	File Transition Layer
GiB .....	GibiByte
GB .....	GigaByte
GC .....	Garbage Collection
GDDR .....	Graphics Double Data Rate
GND .....	Ground
GPT .....	GUID Partition Table
GTX .....	Giga Texel Shader eXtreme
HDD .....	Hard Disk Drive
HP .....	Hot Plug
HSIC .....	High-Speed Inter-Chip
IDE .....	Integrated Drive Electronics
IOPS .....	Input/Output Operations Per Second
KiB .....	KibiByte
KB .....	KiloByte
LAN .....	Local Area Network
LRU .....	Least Recently Used
MiB .....	MebiByte
MB .....	MegaByte
MLC .....	Multi-Level Cell
MOSFET .....	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MSI .....	Micro-Star International
NAS .....	Network Attached Storage
NCQ .....	Native Command Queuing
NFC .....	Near Field Communication
NTFS .....	New Technology File System
NVMe .....	Non-Volatile Memory express
OC .....	Over Clocked
OS .....	Operační systém
PATA .....	Parallel Advanced Technology Attachment
P/E .....	Program/Erase

PC ..... Personal Computer  
 PCB.....Printed Circuit Board  
 PCI..... Peripheral Component Interconnect  
 PCM..... Pulse-code modulation  
 PLC..... Penta-Level Cell  
 PRAM.....Phase-change memory  
 PWDIS.....Power Disable  
 QD ..... Queue Depth  
 QLC ..... Quad-Level Cell  
 RAID ..... Redundant Array of Independent Disks  
 RAM.....Random Access Memory  
 rpm..... revolutions per minute  
 SAS..... Serial Attached SCSI  
 SATA.....Serial Advanced Technology Attachment  
 SATA-IO .....SATA International Organization  
 SD ..... Secure Digital  
 SDIO.....Secure Digital Input Output  
 SI..... International System of Units  
 SLC.....Single-Level Cell  
 SM ..... Silicon Motion  
 SMR..... Shingled Magnetic Recording  
 SRAM..... Static Random Access Memory  
 SSD.....Solid State Drive  
 SSHD ..... Solid State Hybrid Drive  
 SSIC..... SuperSpeed Inter-Chip  
 TiB..... TebiByte  
 TB..... TeraByte  
 TBW ..... TeraByte Written  
 TLC..... Triple-Level Cell  
 UART ..... Universal Asynchronous Receiver-Transmitter  
 UIM ..... User Identity Module  
 USB ..... Universal Serial Bus  
 V-NAND ..... Vertical-NAND  
 VT..... Threshold Voltage  
 WD..... Western Digital  
 WDC.....Western Digital Corporation  
 WL..... Word Line

# 1. Úvod

Pod zkratkou SSD, anglických slov Solid State Drive se v počítačovém odvětví skrývá jeden z nejnovějších typů hardwaru, který má z dlouhodobého hlediska za cíl v osobních počítačích nahradit poslední prvek obsahující pohyblivé mechanické části, jímž stále je klasický pevný disk (HDD). S příchodem těchto čistě elektronických disků nastala na trhu s hardwarem v jistém smyslu revoluce. Do té doby byl totiž magnetický disk jediným možným kandidátem při výběru interního datového úložiště. Vývoj těchto disků byl ale dlouhodobě, zejména co se týče přenosových rychlostí prakticky nulový. Z pohledu konektorového rozhraní rovněž přišel poslední vývojový skok v roce 2009, kdy bylo uvedeno rozhraní SATA 3.0, které bylo již zaměřeno právě na nově vznikající SSD disky, jelikož tehdejší pevné disky nenaplňovali potenciál ani předešlých SATA 2.0.

Jak se s příchodem SSD disků ukázalo, pevný disk byl a stále je výkonnostním úzkým hrdlem, alespoň co se týká běžné práce s počítačem. Ona revoluce právě tkví v rozdílu, s jakou rychlostí lze provádět běžnou činnost na průměrném počítači. Při koupi nového procesoru, operační paměti, či grafické karty uživatel jen těžko zpozoroval zrychlení svého počítače z pohledu rychlosti načítání operačního systému, spouštění programů, či při přesunech souborů. Až právě po přemístění OS a často používaných programů na SSD disk, bylo možné v těchto aspektech zaznamenat onen znatelný výkonnostní skok.

SSD disky nicméně nevycházejí z nové, převratné technologie. V základu jsou založeny na principu flash paměti, kterou běžně využíváme již několik let, ať už v podobě flash disků, SD karet, či jako úložiště dat v mobilních zařízeních. Mimo to některé modely disponují dodatečnou pamětí typu RAM, která je odedávna v počítačích využívána jako paměť operační.

Na to jaký výkonnostní pokrok tyto disky znamenaly, ale rozhodně nebyly od jejich zavedení instantním prodejním hitem. Příčinou toho byla v porovnání s klasickým diskem, zejména relativně malá velikost paměti, v kombinaci s vysokou pořizovací cenou. Dalším odrazujícím faktorem, nově vzniklých disků, byla obzvláště jejich inzerovaná životnost a spolehlivost. Z pohledu druhého jmenovaného problému, se u prvních modelů jednalo dokonce o hrozbu v podobě ztráty dat, ke kterému mohlo jednoduše dojít, při náhlém výpadku elektrického proudu. Problém z pohledu životnosti představoval omezený počet přepsání, jejichž množství jsou paměťové buňky schopny zvládnout.

Na rozdíl však od předchozích problémů, jejichž negativní dopad se během vývoje dařilo snižovat, či dokonce eliminovat, počet přepsání paměťových buněk udávaný výrobci, z důvodu vyšší míry integrace a zvyšování počtu bitů, které bylo možné do jedné buňky uložit, naopak negativním způsobem klesal. Tento trend ale později dokázali významně zredukovat nové 3D paměti.

SSD disky od doby svého uvedení na trh urazily další kus vývojové cesty a v dnešní době již koupě nového PC, bez tohoto zařízení, znamená spousty zbytečně stráveného času, čekáním na jeho odezvu. Otázkou již tedy není, zda ve svém počítači SSD disk chtít, ale jestli má být použit v kombinaci s HDD, či nikoliv.

## **2. Cíl práce**

V teoretické části je cílem této práce dopodrobna obsáhnout problematiku datové paměti se zaměřením na SSD disky, nejen z pohledu fyzikální podstaty, druhů a rozhraní, ale také z pohledu jejich spolehlivosti a životnosti. V praktické části pak syntetickými a uživatelskými testy porovnat několik modelů SSD disků, ať už vzájemně, či v konfrontaci s pevným diskem. Dlouhodobým zatěžováním pak u SSD disků prověřit jejich životnost a spolehlivost. Závěrem také ekonomicky zhodnotit samostatné uplatnění SSD disků, či jejich kombinaci s diskem klasickým.

## **3. Metodika práce**

Úvod teoretické části, této diplomové práce bude zaměřen na elektronickou paměť a její fyzikální podstatu. V následujících částech, budou podrobně popsány jednotlivé typy datových pamětí a popis funkce jednotlivých zařízení, které je využívají. Zvláštní pozornost bude věnována flash paměti a její přímé konkurenci. Závěr teoretické části obsáhne druhy formátů a rozhraní, popis jednotlivých částí SSD disku, se zaměřením na funkce řadiče a na závěr i popis hybridního SSHD disku.

Praktická část se uvede představením vybraných modelů testovaných SSD disků a specifikací měřených parametrů, včetně popisu metodiky. Dále budou změřeny a prezentovány výsledky syntetických a uživatelských testů a zhodnocena výhodnost použití SSD v porovnání s pevným diskem. Všechny disky budou poté vystaveny dlouhodobému, nadměrnému zatížení, za účelem prověření jejich životnosti a spolehlivosti. Závěrem budou shrnuty všechny zjištěné výsledky a spolu s ekonomickým vyhodnocením, doporučeny řešení pro různé požadavky uživatele.

## 4. Počítačová paměť

Osobní počítač, jak jej známe je obvykle složen z mnoha částí. Všechny tyto části jsou považovány za externí a jsou nazývány perifériemi, s výjimkou třech základních, mezi které se kromě zdroje napájení a procesorové jednotky řadí právě počítačová paměť. [1]

Dva základní parametry, skrze které lze na počítačové paměti nahlížet, je přístupová doba a kapacita paměti. S těmi souvisí také datová propustnost, jejíž hodnota je určena především sběrnici a rozhraním, pomocí kterého je k procesoru paměť připojena. Zde platí, že s rostoucí kapacitou je k co nejrychlejšímu přesunu dat, zapotřebí také vyšší propustnost. V případě kapacity je zřejmé, že její ideální hodnota je téměř vždy ta co možná nejvyšší, avšak u některých typů pamětí, si vystačíme s relativně malou kapacitou, ve prospěch druhého parametru, přístupové doby. U té je tomu přesně naopak, jedná se totiž o dobu, za kterou dokáže procesor k datům přistoupit, proto platí, čím nižší hodnota, tím rychlejší paměť je. Tyto dva zásadní parametry spolu úzce souvisí a to tak, že se zvyšující se kapacitou obvykle také roste hodnota přístupové doby. Jak ostatně popisuje tab. 1, typicky k tomuto trendu dochází, se zvětšující se fyzickou vzdáleností dané paměti od procesoru. [1]

Typ paměti	Přístupová doba		Kapacita	Datová propustnost
Registry CPU	0,25 ns		-	-
Cache (SRAM)	1–10 ns		jednotky KB až jednotky MB	> 1 GB/s
DRAM	10–20 ns		jednotky GB	
Flash/SSD	čtení 25–100 $\mu$ s	zápis 250 $\mu$ s	stovky GB až jednotky TB	200 MB/s–5 GB/s
HDD	3–15 ms		stovky GB až jednotky TB	100 MB/s–1 GB/s
DVD	100–500 ms		jednotky GB	500 KB/s–4,5 MB/s

Tabulka 1: Porovnání jednotlivých typů paměti dle přístupové doby [1]

Bezprostředně nejrychlejším typem paměti jsou registry procesoru, které jsou přímo jeho součástí. Přístup k datům, které uchovávají je tedy téměř okamžitý. Poslední větu z předešlého odstavce potvrzuje i fakt, že se zároveň jedná i o paměť s nejmenší kapacitou. Kombinace malé kapacity a rychlého zpracování odpovídá účelu, jemuž registry slouží, tedy krátkodobému

uchování dat pro účely jejich okamžitého zpracování. Na rozdíl od klasické paměti, u které každá adresovaná buňka plní stejnou roli, je použití registrů rozmanitější. Jednotlivé registry se od sebe mohou lišit nejen svou velikostí, či způsobem jakým jsou připojeny, ale také typem operace, jaké jsou do nich ukládány. Zatímco jeden může např. sloužit k ukládání paměťových adres, tak ve druhém mohou být uchovány hodnoty, představující jednotlivé pixely obrázku. Mohou disponovat kapacitou jediného bitu, ale také několika bajtů, nejčastěji pak v rozmezí od 1 do 128 b. [1]

## **4.1. Vnitřní paměť**

Hlavní charakteristikou vnitřní, neboli primární paměti je její volatilita. Vložená hodnota paměti se v ní uchová pouze po dobu udržení stálého napájení. Po vypnutí počítače se tedy takováto paměť zcela vyprázdní. Její hlavní úlohou je umožnit procesoru okamžitý přístup k programovým datům a instrukcím. V počítači lze nalézt dvě takovéto paměti, které používají v základu podobný typ paměťového čipu, jež se ve výsledku liší způsobem svého uplatnění. Jedná se o tzv. RAM (Random Access Memory), v českém překladu paměť s náhodným přístupem. [2] [3] [4]

### **4.1.1. Operační paměť**

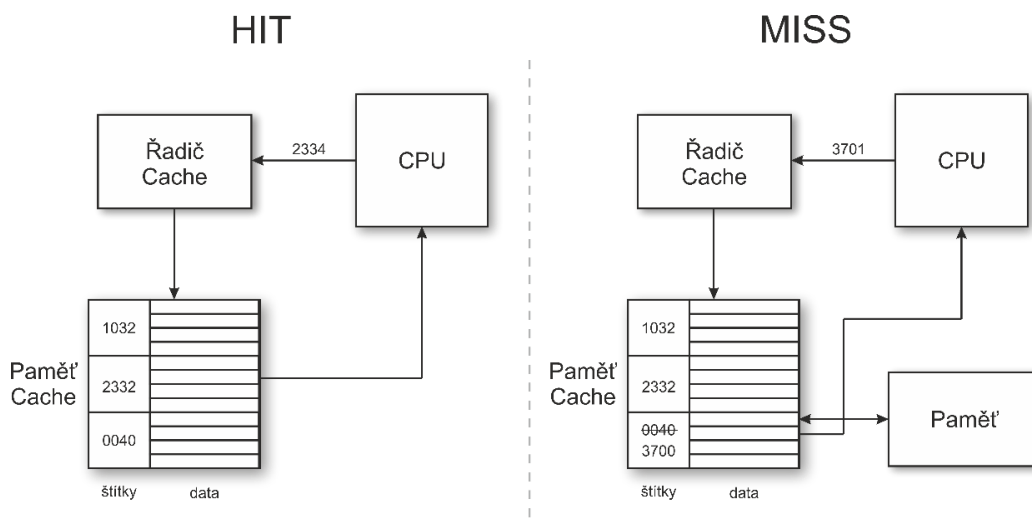
Paměť s relativně velkou kapacitou, ke které má procesor přímý přístup je označována jako operační paměť. Ta je v počítači nejčastěji zastoupena dynamickou RAM (DRAM) pamětí. Každá její paměťová buňka představuje kondenzátorem ovládaný unipolární tranzistor MOSFET. O dynamickou paměť jde z důvodu toho, že musí každých několik milisekund dojít k její obnově elektrickým nábojem, z důvodu vyrovnání jeho úbytku v kondenzátoru. Samostatné použití této paměti by ale z důvodu její vyšší hodnoty přístupové doby znamenalo, velké omezení rychlosti vykonávání procesů, což by z DRAM činilo znatelné výkonnostní úzké hrdlo, při porovnání s mnohem rychlejším procesorem. [2] [3] [4]

Zdaleka nejpomalejším krokem, který nastává při cyklu načítání dat, je přístup k paměti, jež byl zmíněn na samém počátku této kapitoly. Z tohoto důvodu byly v minulosti navrženy tři způsoby, kterými je tato slabina do značné míry kompenzována. Kromě rozšířené datové cesty, díky které je možné načíst více dat najednou a rozdělení paměti na části, tak aby bylo možné současně data načítat z vícero adres, je tím vůbec nejefektivnějším řešením použití tzv. paměti Cache. [2] [3] [4]

## 4.1.2. Paměť Cache

Nejrychlejší vnitřní paměť je realizována statickou RAM (SRAM) pamětí. Ta má oproti DRAM výhodu až třinásobné rychlosti, avšak její kapacita je značně limitována. Paměťová buňka SRAM je totiž tvořena čtyřmi tranzistory a dvěma kondenzátory, kdežto DRAM si vystačí s jediným kusem od každé součástky na jeden bit paměti. To má prvé řadě vliv na velikost čipu, jelikož si několik jednotek megabajtů paměti SRAM, vyžádá zhruba stejné množství fyzického prostoru, jako 64 MB paměti DRAM. S tím souvisí také fakt, že rozměrnější čip s komplexnějším designem, produkuje větší množství tepla. V neposlední řadě mají kvůli tomu paměti SRAM, také vyšší pořizovací hodnotu. [1]

Paměť Cache představuje jakousi skrytou paměť umístěnou mezi hlavní úložiště a procesor, takovým způsobem, že k ní nelze adresně přistoupit, obvyklou programovou cestou. Od běžné paměti se liší také svým uspořádáním, je totiž rozdělena na bloky o přibližné kapacitě od 8 do 64 bajtů. Typická 64KB paměť Cache může tak obsahovat až 8192 bloků po osmi bajtech. Každý tento blok je označen štítkem (tagem), který označuje pozici odpovídající datům z hlavního úložiště, jež jsou v bloku reprezentovány v exaktní formě. Paměť Cache je ovládána vlastním řadičem, jehož funkci popisuje obr. 1. [1]



Obrázek 1: Proces načítání dat skrze paměť Cache, zdroj: vlastní na základě [1]

V okamžiku, kdy si procesor vyžádá data, nebo instrukce z hlavního úložiště, tento řadič nejprve zkontroluje, zda nejsou již uložena v paměti Cache. V případě, že tomu tak je, se paměť Cache zachová jako hlavní úložiště a předá data, či instrukce CPU. Takovýto případ je nazýván jako „hit“. Pokud žádaná data v paměti Cache uložena nejsou, je zapotřebí vykonat mezikrok, který spočívá v načtení dat z hlavního úložiště do paměti Cache, včetně informace o jejich umístění. V takovém případě se jedná o tzv. „miss“. [1]



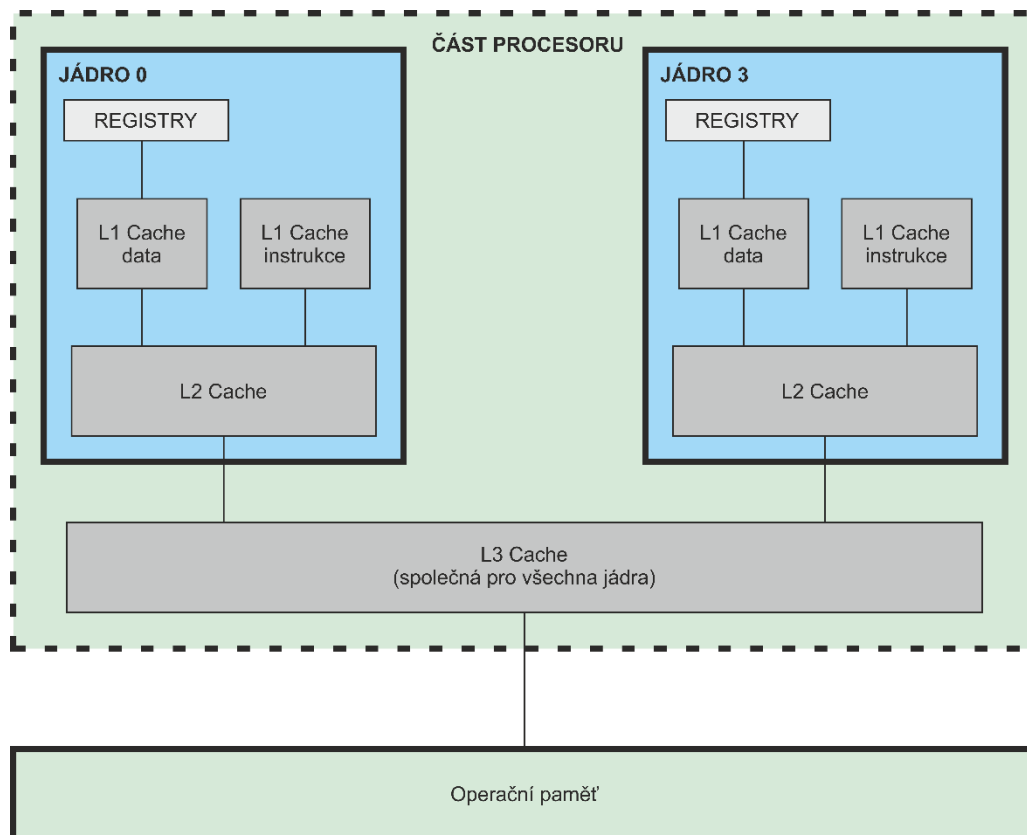
Tím však funkce řadiče nekončí, dále se stará zejména o to, aby procesorem pozměněná data, byla vrácena na původní místo v hlavním úložišti a rovněž zajišťuje nutnou výměnu bloků, když dojde k jejich zaplnění. Ta probíhá pomocí algoritmu LRU, který za nový vymění blok, jež byl používán před nejdelsí dobou. [1]

V dnešní době je standardem paměť Cache o několika úrovních. Typicky pak bývají tři (L1, L2, L3), přičemž každá z úrovní disponuje vlastním řadičem. V takovém případě je CPU využívá dle pořadí, ve kterém jsou vůči němu umístěny, přičemž Cache levelu 1 je mu nejbliže. Pokud požadovaná instrukce, či data nejsou uložena v L1, je požadavek zaslán řadiči úrovně 2 atd. Víceúrovňová paměť Cache má však smysl pouze v případě, kdy každá vyšší úroveň disponuje znatelně vyšší kapacitou, než ta předchozí. Srovnání velikostí kapacit jednotlivých úrovní, pro různé modely procesorů je uvedeno v tab. 2. [4] [5]

Rok uvedení do prodeje	Model procesoru	Počet fyzických jader	L1	L2	L3	Počáteční cena
2020	Intel Core i7-10700K	8	2x32 KB	256 KB	16 MB	\$387
2020	AMD Ryzen 7 5800X	8	2x32 KB	512 KB	32 MB	\$449
2019	Intel Core i5-9600	6	2x32 KB	256 KB	9 MB	\$224
2019	AMD Ryzen 5 3600	6	2x32 KB	512 KB	16 MB	\$199

*Tabulka 2: Porovnání kapacit jednotlivých úrovní Cache paměti vybraných modelů procesorů [6]*

Jak popisuje obr. 2, každé jádro dnes běžně vyráběných desktopových procesorů, má vlastní L1 a L2 Cache. Zároveň jak je již naznačeno ve čtvrtém sloupci tab. 2, je první úroveň rozdělena na dvě části, určené zvláště pro data a instrukce. Úroveň L3 je již společná pro všechna jádra a její využití, je smysluplné v případě přítomnosti čtyř a více fyzických jader. [4] [5]



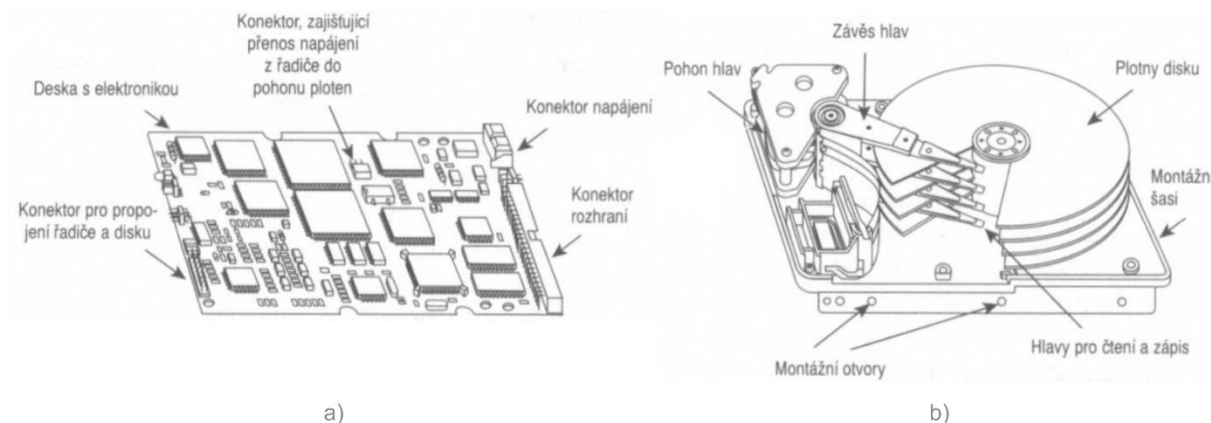
Obrázek 2: Rozmístění jednotlivých úrovní Cache pamětí v procesoru , zdroj: vlastní na základě [7]

## 4.2. Vnější paměť

Paměť, jejíž hlavní úkol spočívá v dlouhodobém uchování dat, je považována za tzv. vnější paměť. Jedná se tedy o hlavní úložiště, kde jsou trvale umístěna osobní data uživatele, včetně operačního systému. Její charakteristikou je v porovnání s paměťmi, jež byly popsány v předchozích podkapitolách, obrovská kapacita, avšak z důvodu řádově delší přístupové doby i signifikantně nižší přenosové rychlosti. To je ovlivněno zejména tím, že k tomuto typu paměti procesor nemá přímý přístup. Práci s daty a programy zde uloženými, musí předcházet jejich načtení do operační paměti počítače. Před nástupem SSD disků, které zaznamenaly velký rozmach v průběhu minulé dekády, existovalo jediné zařízení, které plnilo funkci vysokokapacitního úložiště, a tím byl již zmíněný pevný disk.

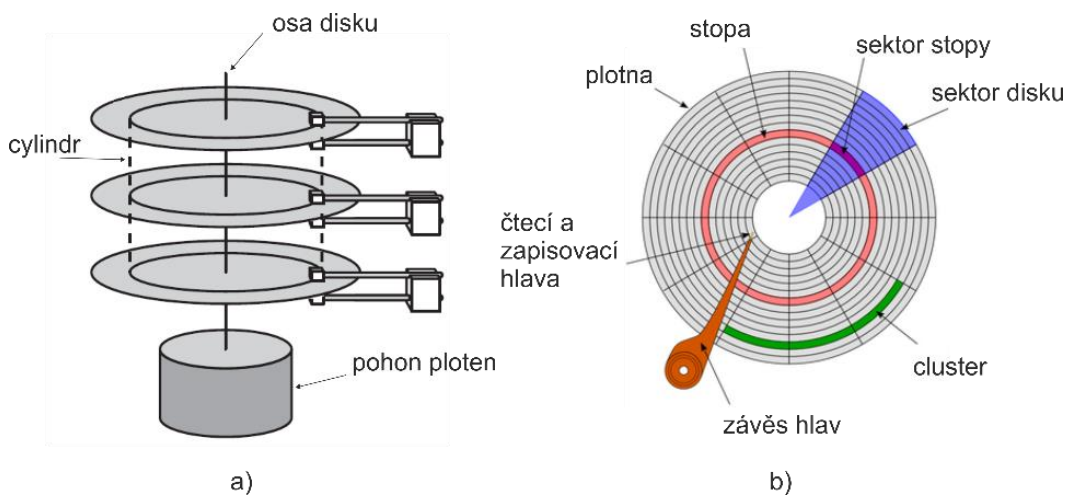
## 4.2.1. Magnetická paměť

Jak bylo zmíněno již v úvodu, hard disk je tou vůbec nejvíce omezující součástí v rámci počítačového výkonu. Svůj primát drží také v tom, že pokud vynecháme mechaniku na optické disky, jde o poslední částečně mechanickou komponentu uvnitř počítače. Její setrvání v moderních sestavách je však stále opodstatněno nejnižším poměrem ceny za gigabajt úložného prostoru. Na obr. 3 lze vidět, z jakých částí je složen.



Obrázek 3: Části pevného disku a) deska s elektronikou, b) celkový pohled [8]

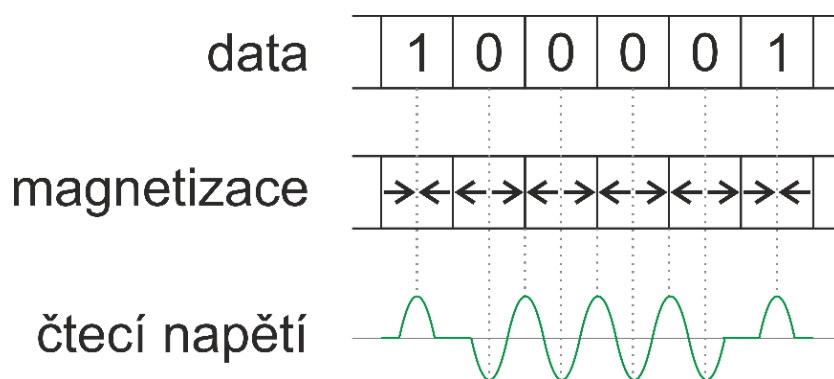
Pevný disk se skládá z několika plochých kruhových ploten vyrobených ze skla, kovu, nebo plastu, potažených vrstvou magnetické látky. Tyto plotny jsou stejně jako závěs s čtecími a zapisovacími hlavy, poháněné vlastním elektromotorem. Uvnitř kovového pouzdra se nachází také řídicí deska a vzduchové filtry. Plotny disku jsou usazené na jedné ose, která rozvádí pohon elektromotoru, vedoucí od spodní části disku. Čtecí a zapisovací hlavy obklopují každou z ploten z obou stran, viz obr. 4a. Na plotně rozeznáváme několik oblastí, které jsou popsány na obr. 4b. [1]



Obrázek 4: Schématické zobrazení ploten HDD a) pohled z boku, b) pohled shora, zdroj: vlastní na základě [1] [10]

Soustředná kružnice se nazývá stopou, jednotlivé kruhové výseče pak sektory. Jelikož se hlavy pohybují na společném závěsu, jsou vždy umístěny nad stejnou stopou, jejich množina dohromady tvoří cylindr. Průnik stopy a sektoru představuje nejmenší adresovatelnou část disku. Kapacita těchto paměťových bloků je konstantní (4096 B), z čehož vyplývá fakt, že sektory, které jsou blíže středu plotny, mají tendenci být hustěji zaplněny, než ty na jejím okraji. Proto jsou moderní disky rozděleny do několika zón, ve kterých je odlišný počet sektorů, což napomáhá vedle efektivnějšího využití místa, umožnit ponechání konstantních otáček motoru. Řadič poté některá data musí pozdržet ve vyrovnávací paměti, aby se na rozhraní dostala najednou, jelikož při tomto řešení není zásobován daty vždy stejnou rychlostí. Část disku, se kterou pracuje operační systém, se nazývá cluster. Ten představuje oblast složenou z několika sektorů, jejichž počet se odvíjí od souborového systému v jakém je disk naformátován. [1] [9] [10] [12]

Zápis dat probíhá magnetizováním potahové látky plotny, která je vyrobena z feromagnetického materiálu. Tento proces je prováděn elektromagnetem, umístěným na konci magnetorezistivní čtecí a zapisovací hlavy. Magnetizace je polarizována dvěma směry, přičemž jak z názvu součástky vyplývá, tato hlava je schopna směr polarizace také detekovat, čímž je zajištěno čtení dat. Sekvenční změny směru polarizace pak reprezentují jednotlivé bity. [9]



Obrázek 5: Způsob čtení dat z HDD, zdroj: vlastní na základě [9]

Čtení obstarává prvek, který je citlivý na změnu eklektického odporu, při vystavení magnetickému poli. Jak je naznačeno na obr. 5, logická hodnota (0 nebo 1) je určena charakteristickou změnou pořadí polarizace. Odlišný způsob čtení, který se v minulosti používal, zaznamenával změnu logické hodnoty pokaždé, kdy došlo ke změně směru polarizace. V důsledku toho se objevovala chyba v podobě ztráty synchronizace řadiče, v případech kdy dlouho nedocházelo ke změně polarizace a tedy i změně logické hodnoty. [9]

K přečtení (zápisu) požadovaných dat disk musí vykonat hned činnosti, na kterých lze demonstrovat, jak jeho mechanické části zpomalují celý proces načtení dat procesorem. Prvním krokem je přemístění hlavy nad požadovanou stopu. Poté je zapotřebí nalézt začátek sektoru, v němž se požadovaná data nachází (popř. kam se mají zapsat). Toho je dosaženo otočením disku, přičemž typická rychlost otáčení běžných HDD, je 5 400 nebo 7 200 otáček za minutu, u disků využívaných v serverech pak běžně tato hodnota přesahuje 10 000 rpm. Doba nalezení počátku sektoru je odlišná, v závislosti na výchozí poloze hlavy. Nejdéle trvá, když se nachází v požadovaném sektoru, avšak nikoliv na jeho počátku. Následná doba přečtení (zápisu), pak závisí na počtu sektorů v konkrétní stopě. [1] [12]

Všechny tyto úkony jsou ovládány řadičem disku, jemuž na počátku procesor odeslal žádost o načtení (zápis) konkrétních dat. Celkový čas potřebný k vykonání těchto úkonů reprezentuje přístupovou dobu disku, jejíž hodnota se pohybuje v rozmezí od deseti do patnácti milisekund, což je řádově milionkrát více, než v případě paměti Cache. [1] [11]

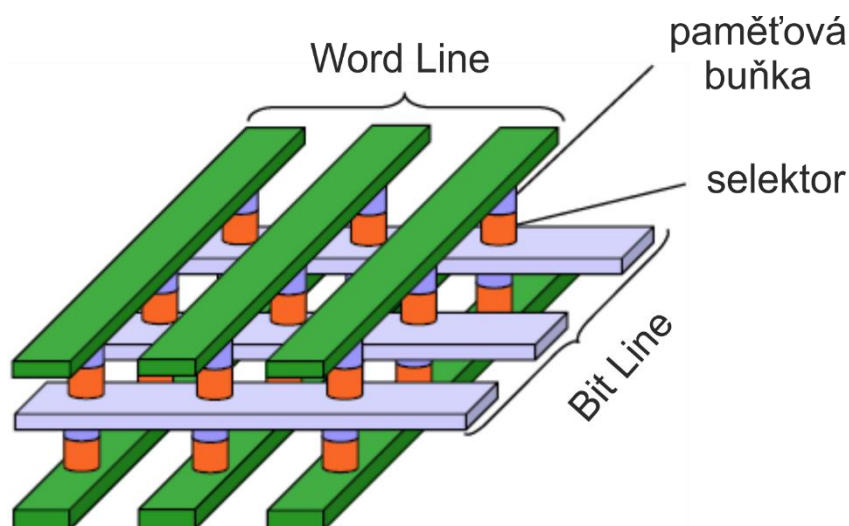
Adresace dat je založena na vzájemné komunikaci řadiče disku s „host adaptérem“, umístěným na základní desce počítače. Použitá technologie se odvíjí od typu rozhraní, kterým je disk na základní desku připojen. V minulosti bylo možné kromě konektoru pro napájení a paralelního rozhraní IDE, na tomto zařízení spatřit také šestici pinů, přičemž jejich zkratováním pomocí tzv. jumperů, bylo možné určovat roli několika disků, či optických mechanik, připojených na stejném kabelu, k jedné sběrnici. Tato doba je již nějakou dobu pryč, jelikož dnešní magnetické disky, se na základní desku připojují výlučně pomocí sériového rozhraní SATA. [1] [12]

Velké oblibě se těší také disky externí, které se připojují ke sběrnici USB. Pro potřeby opravdu velkých paměťových kapacit se používají tzv. NAS (Network Attached Storage) servery, které využívají diskových polí RAID, připojených k lokální síti. Mezi hlavní výrobce magnetických disků, určených pro osobní počítače se řadí americké společnosti Western Digital a Seagate, kterým v omezené míře konkuruje japonská Toshiba. Pro desktopové počítače je typický 3,5" formát, v notebookech se kvůli limitovanému prostoru objevují výhradně 2,5" varianty. [13]

## 4.2.2. 3D XPoint

Dalším typem nevolatilní paměti, kterou lze v dnešních PC nalézt, nese název 3D XPoint. Jedná se o paměť vyvinutou ve spolupráci společnostmi Intel a Micron, která byla přivedena na trh v roce 2015, v podobě tzv. Intel Optane Memory. Jejím cílem od počátku bylo vyplnit výkonnostní mezeru, mezi operační pamětí a hlavním úložištěm, přičemž původním příslibem byla možnost nahradit jednu z těchto pamětí, ať už jako pomalejší operační paměť v porovnání s DRAM, nebo mnohem rychlejší úložiště v porovnání s magnetickým diskem. [14] [15] [17]

Paměti 3D XPoint jsou založeny na zcela originální technologii, která na rozdíl od SSD disků nevyužívá tranzistorů. Jak samotný název napovídá struktura „Crosspoint“ spočívá v řešení, kde jsou ke každé paměťové buňce připojeny dva vodiče, nazývané Bit Line a Word Line, reprezentující řádky a sloupce, jimiž je zajištěna adresace. Každé paměťové buňce pak přísluší vlastní selektor, viz obr. 6. [14] [15] [17]

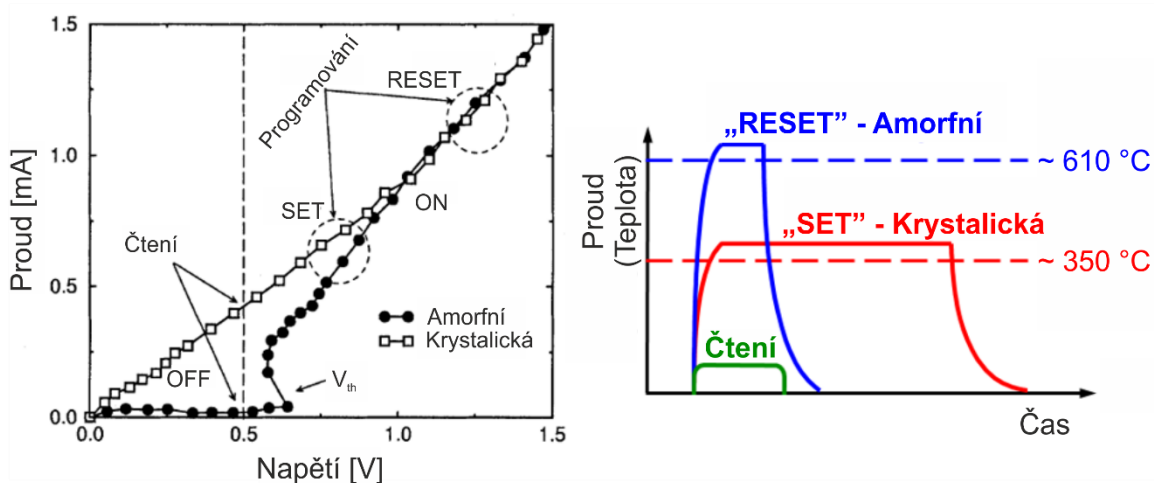


Obrázek 6: Schématické zobrazení paměti 3D XPoint, zdroj: vlastní na základě [15]

Právě v možnosti adresovat jednotlivé buňky spočívá největší výhoda této paměti, kterou nabízí oproti paměti NAND, na níž jsou založeny klasické SSD disky. Ta pracuje s tzv. stránkováním paměti, kdy je paměť rozdělena na jednotlivé virtuální bloky. Při změně jediného bajtu, je pak zapotřebí znovu přepsat celý blok, což jednak trvá déle a také se přitom jednotlivé paměťové buňky opotřebovávají. To však není případ paměti 3D XPoint, kde je možné přepisovat jednotlivé bity bez nutného mazání a opětovného přepisování. [14] [15] [17]

V principu se jedná o tzv. PRAM, tedy paměť využívající fázovou přeměnu. Princip spočívá v použití slitin polokovů (Germanium, Antimon a Tellur), které mají několik stabilních stavů, lišící se svou charakteristikou elektrického odporu. Zvýšením hodnoty napětí, dochází k ohřevu, čímž nastává také ke zvýšení hodnoty elektrického odporu. Díky této schopnosti setrvat v několika stabilních stavech, je pak možné provádět čtení, zápis a hlavně přepis dat bez nutnosti cokoliv mazat. [14] [15] [17]

Celý tento proces je znázorněn na obr. 7. Je-li materiál v amorfním (neuspořádaném) stavu, nevede elektrický proud, dokud není překročeno jeho prahové napětí. Poté, se zvyšujícím se napětím, roste elektrický proud a ohříváný materiál začne vykazovat odpor. Tím se opět ještě více začne zvyšovat teplota. Po překonání hranice zhruba 350 °C, se molekuly začnou uspořádávat do krystalické struktury. Za předpokladu, že je tato teplota zachována po dobu přibližně sta nanosekund, je proveden zápis do paměti. Při zachování těchto podmínek se materiál začne pomalu ochlazovat. K tomu aby začal vést elektrický proud, již stačí přivést napětí o hodnotě zhruba 0,5 V. Pro přepsání paměti, je nutné dosáhnout teploty okolo 600 °C, čímž se materiál dostane do fáze tavení. Následně se rapidně ochladí, tak že se přemění do amorfního stavu. K přečtení informace pak postačí napětí 0,1 V. [14] [15] [17]



Obrázek 7: Proces zápisu, přepisu a čtení paměti typu PRAM, zdroj: vlastní na základě [15]

Všechna tato technická data zní sice veskrze pozitivně, avšak paměť 3D XPoint dosud na běžném trhu velký úspěch nezaznamenala. Může to být zapříčiněno vysoko nastavenou cenou, v přepočtu za gigabajt kapacity, nebo komptabilitou stanovenou výhradně pro procesory od značky Intel. Největším problémem však může být nešťastné zacílení trhu spojené s nedostatečnou propagací. Intel Optane Memory totiž nenaplnil počáteční příslib náhrady jednoho typu paměti a místo toho se stal podobným doplňkem, jakým je i klasický SSD disk, který se však stává stále dostupnějším, a tím i vhodným jako plnohodnotná náhrada magnetického disku. Místo toho se Intel Optane Memory prezentuje jako fyzická Cache paměť, doplňující hlavní úložiště a operační paměť počítače. [17]

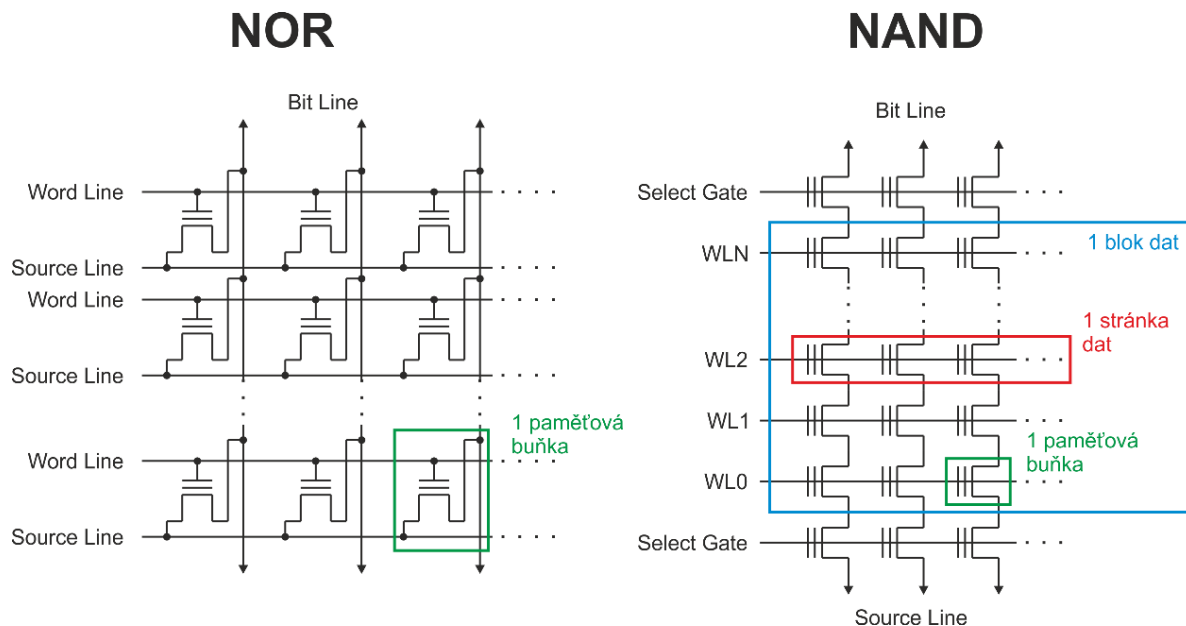
Běžným zákazníkům se nabízí v kapacitách od 16 do 118 gigabajtů. Podle serveru heureka.cz, se průměrná cena modelu o kapacitě 32 GB pohybovala od uvedení na trh, tedy od jara 2019 do podzimu roku 2020, stabilně lehce nad hodnotou 2 000 Kč. Za cenu znatelně nižší bylo přitom možné v tomto období zakoupit SATA SSD s kapacitou 500 GB, nebo za cenu o něco vyšší stejný model s kapacitou jednoho terabajtu. [17] [18] [19]

Srovnání těchto dvou odlišných koncepcí se tedy nabízí pouze pro případ kombinace dvou rozdílných úložišť. Intel Optane Memory může být alternativní volbou zrychlení počítače, který disponuje pouze pevným diskem, jenže k tomuto účelu velmi dobře poslouží i SSD disk, který navíc nabídne za podobnou cenu mnohem větší kapacitu paměti. Maximální výkon lze pak vytěžit z kombinace rychlého SSD s Optane, což si v průběhu roku 2019 uvědomila i společnost Intel, která představila úložiště kombinující obě technologie. Tento krok může potenciálně naznačit budoucí směr vývoje této paměti. [16]



### 4.2.3. Flash paměť

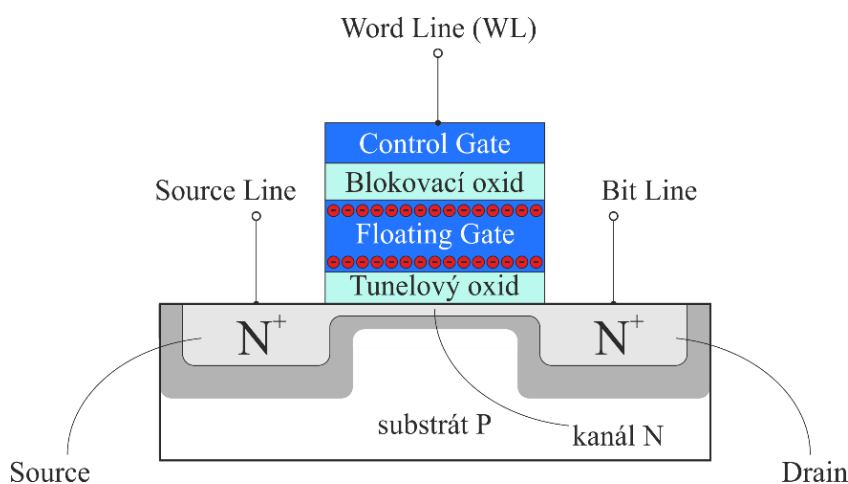
Posledním typem nevolatilní paměti, kterou lze v počítači nalézt je paměť flash. Tento druh paměti byl vyvinut již koncem 80. let minulého století japonskou společností Toshiba. V praxi rozeznáváme dva druhy, podle toho, zda využívají logická hradla typu NOR, či NAND. NOR flash jsou využívány v pamětech typu EEPROM, jelikož je lze snadno elektronicky mazat a přeprogramovat. Naopak NAND paměti byly před nástupem SSD disků, kde je jejich hlavní využití dnes, k nalezení v MP3 přehrávačích, paměťových kartách a také v po nich pojmenovaných flash discích. Jak lze vidět na obr. 8, kvůli své složitější struktuře nelze vyrábět NOR paměti s takovou hustotou jako paměti NAND, což se projevuje na jejich celkové kapacitě. Mají však výhodu v tom, že lze každý jednotlivý bajt samostatně adresovat pomocí vodičů Bit Line, Word Line a Source Line. Díky tomu lze z této paměti rychleji data načíst, ale pomaleji do ní ukládat. Před zápisem do obou těchto pamětí je totiž zapotřebí zvolenou část nejprve smazat, což nahrává blokovému přístupu, který využívá paměť NAND. Před zápisem, který se u NAND pamětí provádí po stránkách (page), musí dojít k vymazání celého bloku (block). Čtení pak opět probíhá na úrovni celé stránky. Tyto pojmy jsou graficky znázorněny rovněž na obr. 8. [20] [21] [22]



Obrázek 8: Porovnání paměťových struktur NOR a NAND, zdroj: vlastní na základě [21] [22]

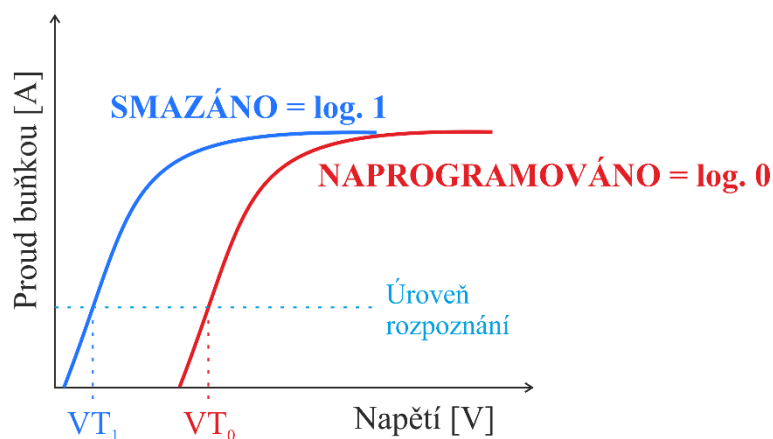
Jednotlivé paměťové buňky jsou tvořeny speciálními MOSFET tranzistory s plovoucím hradlem (Floating Gate). Namísto jedné, tedy disponují dvěma elektrodami Gate, jež jsou od sebe izolovány blokovacím oxidem. Oxid, který izoluje řídicí elektrodu (Control Gate) od kanálu tranzistoru bývá nazýván tunelovým. Společně tyto dvě elektrody řídí množství

procházejícího proudu z elektrody Source směrem do elektrody Drain. Floating Gate dokáže uchovat informaci v podobě elektronového náboje po relativně dlouhou dobu, bez odběru vnějšího proudu, právě díky zmíněné elektrické izolaci, viz obr. 9. [20] [22]



Obrázek 9: Paměťová buňka NAND – Tranzistor MOSFET s plovoucím hradlem, zdroj: vlastní na základě [22]

V případě, že jde o prázdnou, neboli vymazanou buňku, náboj v elektrodě Floating Gate uskladněn není, prahové napětí má hodnotu  $V_{T1}$  a paměťová buňka je ve stavu logické 1. Pokud má být buňka naprogramována, musí být přivedeno poměrně vysoké napětí (13 V), přes vodič Word Line, na elektrodu Control Gate. Tím vznikne elektrické pole a dojde tak k procesu zvanému Fowler–Nordheimovo tunelování, kdy vzniká potenciální bariéra, která umožní elektronům ze substrátu překonat izolační vrstvu oxidu a nahromadit tím náboj v elektrodě Floating Gate. Tímto procesem dojde k navýšení prahového napětí na hodnotu  $V_{T0}$  a paměťová buňka změní svůj stav na hodnotu logické 0, což lze vidět na obr. 10. [22] [23] [24] [25] [26] [27] [28]

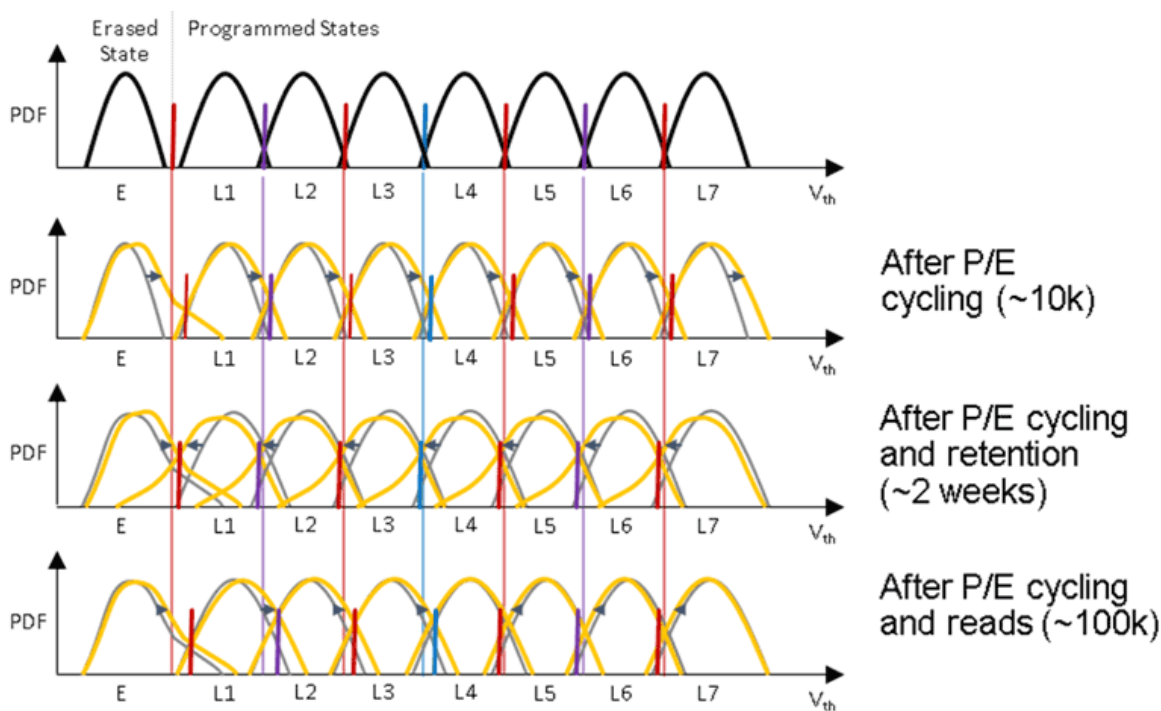


Obrázek 10: Voltampérová charakteristika paměťové buňky, zdroj: vlastní na základě [22]

Při čtení dat je na řídicí elektrodu přivedeno referenční napětí o hodnotě ležící mezi  $VT_1$  a  $VT_0$ . Poté dojde k vyhodnocení stavu, který je určen na základě proudu procházejícího z elektrody Source do elektrody Drain. V případě, že je hodnota tohoto proudu nižší, než prahová, je stav vyhodnocen jako logická 1 (buňka je naprogramována). Pokud je tomu naopak, tedy hodnota procházející proudu je vyšší, než prahová hodnota, je stav vyhodnocen jako logická 0 (buňka je vymazaná). [22] [23] [26]

Při procesu mazání, který musí být proveden rovněž před každým zápisem, je přivedeno kladné napětí na substrát a řídicí elektroda je uzemněna. Tím dojde opačnému tunelování, kdy jsou elektrony vytahovány z Floating Gate, přes izolační vrstvu oxidu do substrátu. V ideálním případě dojde k poklesu prahového napětí na hodnotu  $VT_1$  a paměťová buňka změní svůj stav na hodnotu logické 1. [22] [23] [26]

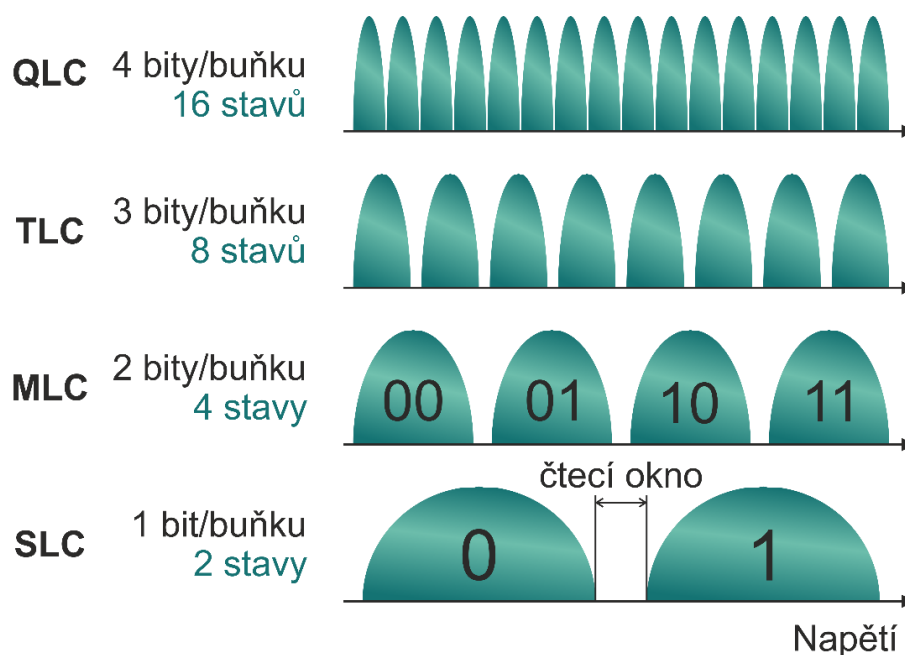
Samotné neustálé přesouvání náboje ze substrátu do Floating Gate a zpět, je právě slabou stránkou paměti flash. Je jí totiž způsobováno opotřebování izolační vrstvy blokovacího oxidu, v důsledku čehož zároveň dochází ke změnám hodnot prahových napětí  $VT_1$  a  $VT_0$ . Tyto hodnoty se k sobě pomalu přibližují až do doby, kdy je není možné od sebe rozlišit a tím i přečíst správnou logickou hodnotu, která je v paměťové buňce uložena. Tento trend lze zpozorovat na obr. 11. [28] [94] [30]



Obrázek 11: Vývoj prahových napětí při rostoucím počtu P/E cyklů [91]

Parametr P/E Cycle (Program/Erase Cycle) udává, kolik cyklů přepsání by měla taková paměťová buňka vydržet. Toto číslo je však pro běžného uživatele těžko představitelné, proto výrobci, dnes již spíše jako ukazatel výdrže používají hodnotu TBW (TeraBytes Written), tedy kolik terabajtů dat jsou SSD disky schopny zapsat, než se objeví první poškozené buňky. [28] [30] [94]

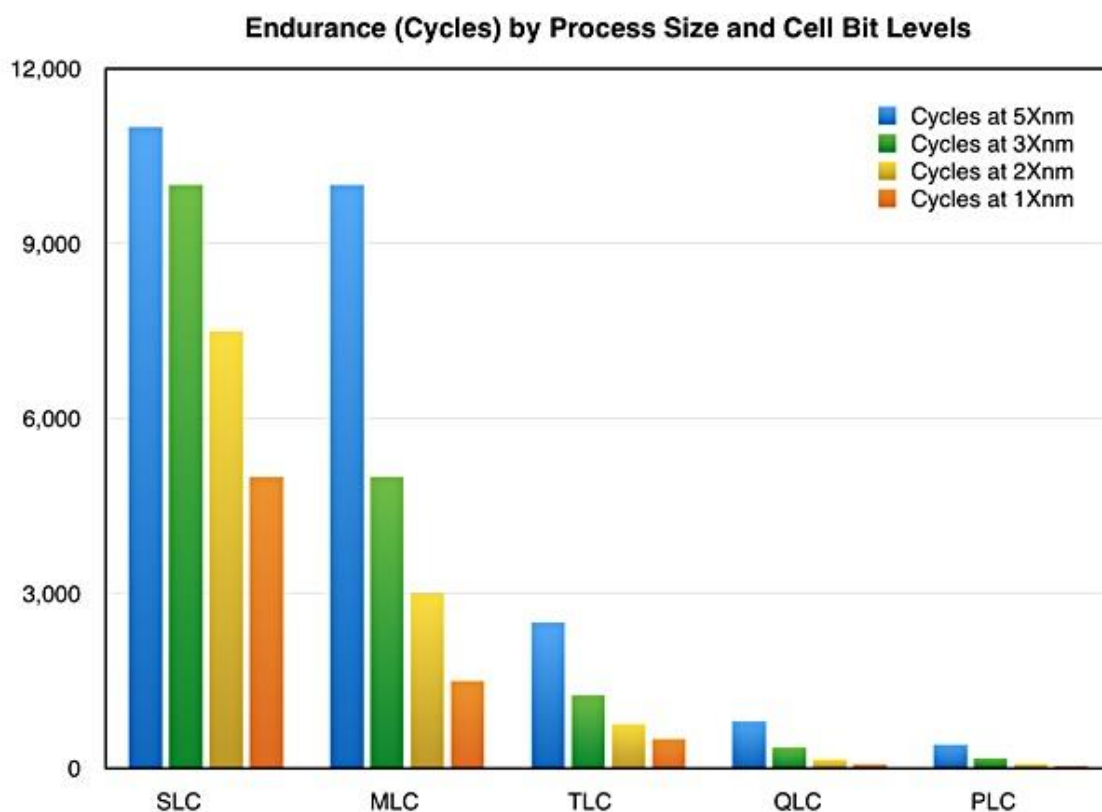
Jde sice o neobvyklý trend ve vývoji hardwaru, ale teoretická životnost SSD disků se nějaký čas po jejich masovém rozšíření na trhu zhoršovala. Důvodem byla snaha výrobců o dosažení vyšších paměťových kapacit, za relativně malý nárůst prodejní ceny. Toho bylo dosaženo technologií MLC (Multi-Level Cell), díky které lze do jedné buňky zapsat vícebitovou informaci. Buňkám, které dokáží zapsat pouze dva stavy, se říká SLC (Single-Level Cell). Náhlý úpadek teoretické životnosti víceúrovňových buněk byl způsoben tím, že rozdíl mezi hodnotami prahových napětí jednotlivých stavů se zmenšil prakticky na polovinu, a proto se k sobě dříve přiblížili tak, že nebylo možné tyto stavy od sebe rozeznat. Technologie SLC přitom dnes již téměř zanikla, jelikož je levnější vyrobit SSD s buňkami MLC, o stejné kapacitě jako s buňkami SLC. Naopak se zvyšujícími se uživatelskými nároky na kapacitu paměti se postupně navyšuje počet bitů, které do jedné buňky můžeme ukládat. Většinový podíl na dnešním trhu tak mají SSD disky s paměťovými buňkami TLC (Triple-Level Cell), následované SSD s buňkami QLC (Quad-Level Cell) a do budoucna se již hovoří také o PLC (Penta-Level Cell). Přehled napěťových úrovní a jím odpovídajícím stavům lze vidět v obr. 12. [23] [28] [29]



Obrázek 12: Porovnání jednotlivých druhů paměťových buněk [93]

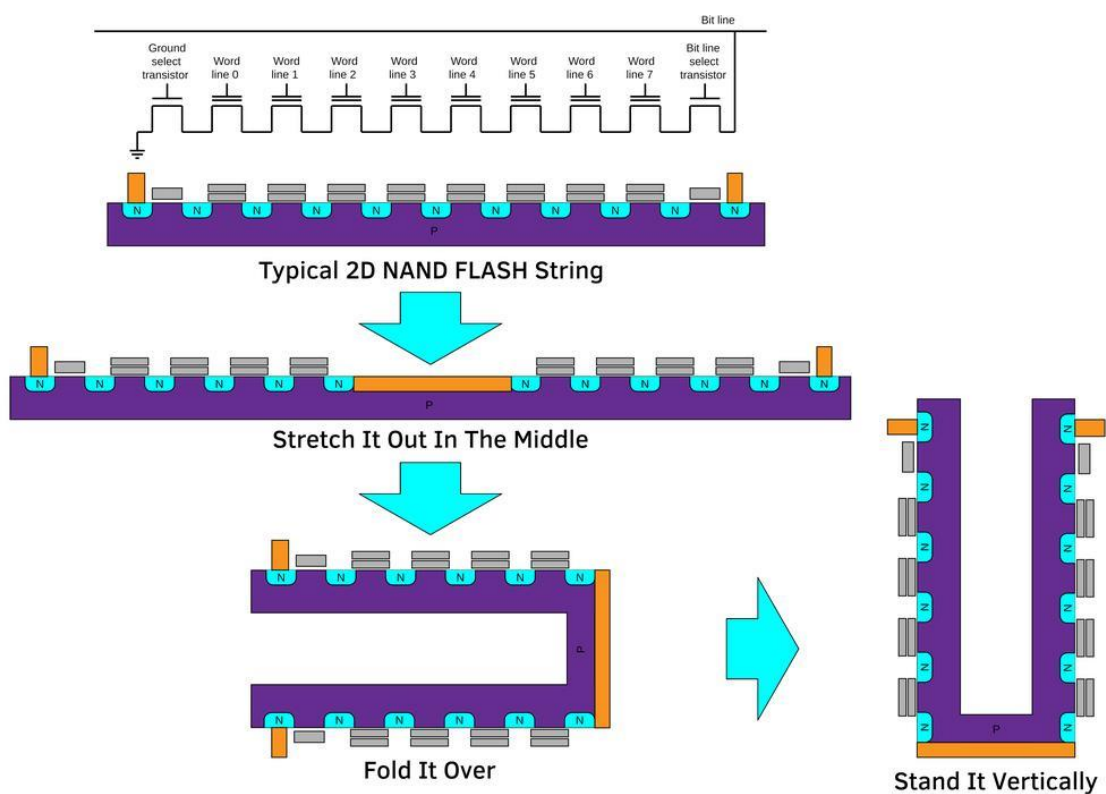
Z logiky věci také plyne, že novější typy pamětí jsou stále pomalejší, jednak z důvodu složitějšího odměřování napěťové úrovně, s čím souvisí také delší přístupová doba, a rovněž protože řadiče SSD disků musí disponovat komplexnějšími metodami pro kontrolu integrity dat. Ve vývoji v oblasti rychlosti, nové SSD disky ale problém nemají. Výrobci se totiž vždy v horizontu několika let úspěšně daří naplnit potenciál nových rozhraní. [30]

Nejpalčivějším problémem těchto pamětí, který se výrobci snaží nadále co nejvíce eliminovat, je tak stále mnohokrát zmiňovaná životnost. Kromě zvyšování kapacit jednotlivých buněk se výrobci snažili neustále navyšovat celkovou kapacitu vyšší mírou integrace, tedy zmenšováním geometrie výrobního procesu. V určitém bodě, ale začalo docházet ke vzájemnému ovlivňování sousedních buněk, proto museli výrobci přehodnotit řešení elektrody Control Gate, která tak nově měla sloužit jako kryt hradla Floating Gate. Negativní vývoj v životnosti, s narůstajícím počtem bitů, uložených do jedné paměťové buňky a zmenšováním výrobního procesu je zobrazen v grafu na obr. 13. [31] [92]



Obrázek 13: Vývoj v udávané životnosti SSD disků [92]

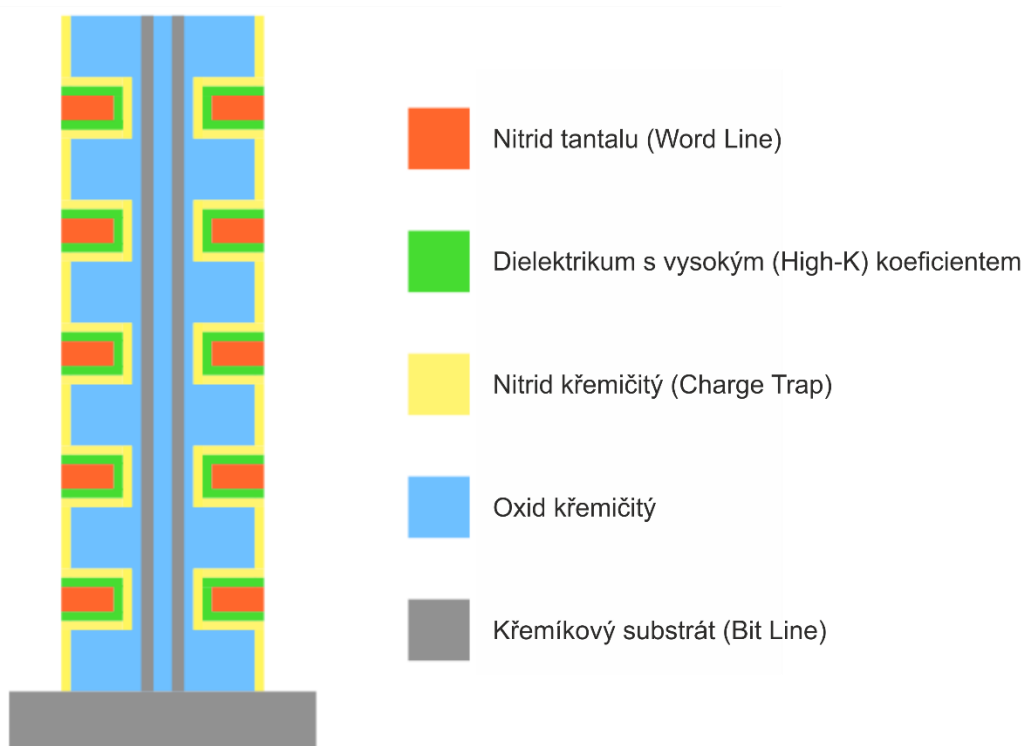
Revoluce pak nastala s příchodem 3D technologie, kterou jako první v roce 2013, na trh uvedl Samsung ve svém modelu 850 Pro. Nebyl však jediným, kdo tuto technologii vyvíjel. Již v roce 2007 Toshiba představila podobný koncept, který nesl název BiSC (Bit Cost Scaling). Rozdíl v konceptu mezi planární (2D) a 3D technologií je k vidění na obr. 14. Lze si to představit tak, že uprostřed každého řetězce buněk je vytvořena mezera, celý je ohnut do tvaru písmene U a otočen vertikálně, proto se můžeme v praxi setkat s označením V-NAND. [31] [32] [33]



Obrázek 14: Rozdíl v rozložení paměťových buněk u planární a 3D technologie [31]

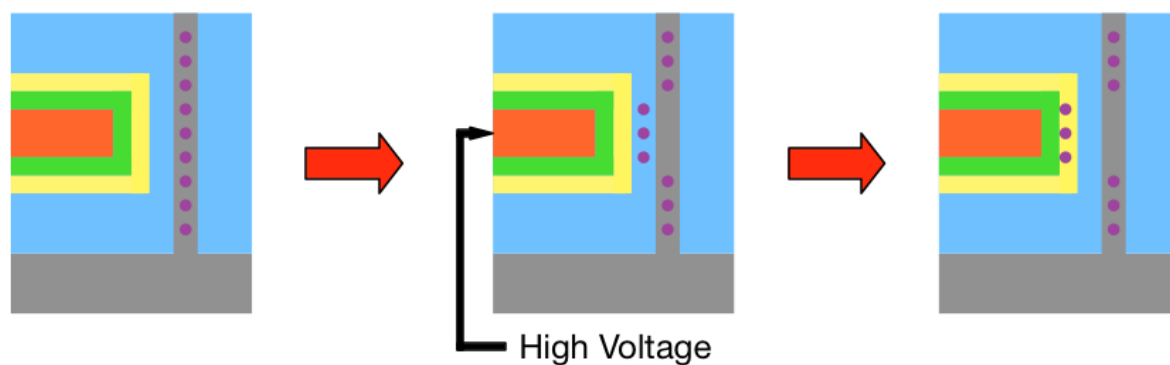
Při výrobě je na čipu nejprve vytvořena CMOS logika, která slouží jako periférie. Na tu je poté nanášena vrstva substrátu, jež je opatřena vodivými cestami, umožňující adresovat oba sousední sloupce. Tato vrstva je pak odizolována oxidem křemičitým. Na ní jsou umístěny již první Word Line a Control Gate, tvořené polykrystalickým křemíkem, nebo nitridem tantalu. Tyto dvě vrstvy se pak opakují až po dosažení konečného počtu. Ve středu těchto vrstev je vytvořeno několik děr, které jsou vyklepány skrze všechny vrstvy až k substrátu. Vnitřní stěny těchto otvorů jsou potaženy vrstvou oxidu křemičitého, čímž je utvořeno dielektrikum mezi Control Gate a Floating Gate. Na dielektriku je nanášena vrstva nitridu křemičitého, která představuje hradlo Floating Gate. Zbývající prostor válcového otvoru je vyplněn tunelovým oxidem. [33]

Výrobci v oblasti 3D NAND již ale neoperují s názvem Floating Gate, nýbrž Charge Trap (zachycovač náboje) a pojmenovali tím tak i poddruh této paměti flash, tedy CTF. Tato část, jak již bylo zmíněno v předchozím odstavci, je vyrobena z nitridu křemičitého, který má velmi dobré izolační vlastnosti. Je tak díky tomu možné umístit jednotlivé buňky blíže k sobě, aniž by se navzájem ovlivňovali. Tímto způsobem byla do značné míry zlepšena i životnost paměťových buněk, jelikož izolátor není tak náchylný na opotřebení, také díky tomu, že při programování jednotlivých buněk je použito nižší napětí, než v případě paměti s Floating Gate. Charge Trap je od SiO<sub>2</sub> kanálu izolována dielektrikem s vysokým (High-K) koeficientem. Toto řešení umožňuje jednak užší provedení, a také právě potřebu nižšího napětí pro tunelování elektronů. Uspořádání a použité materiály jednotlivých vrstev jsou popsány na obr. 15. Pro představu, dvě buňky ležící naproti sobě tvoří jednu vrstvu. Dnešním standardem 3D TLC paměti je 96 takovýchto vrstev. Na konci roku 2020 tchajwanská společnost Micron oznámila dokonce výrobu 176vrstevých 3D paměti, což by pro spotřebitele mohlo znamenat potenciální nárůst maximálních kapacit a s tím související snížení cen u nižších modelů. [32] [33] [34] [35]



Obrázek 15: Struktura pětivrstvé 3D flash paměti, zdroj: vlastní na základě [32]

Princip přenosu náboje a tím i programování buněk je v zásadě totožný jako u planární technologie. Každá buňka je připojena na World Line a uzemněný Bit Line (0 V), po přivedení napětí na WL se elektrony tunelují přes oxid křemičitý do Charge Trap, viz obr. 16. Při čtení je nulové napětí na World Line, na Bit Line jsou aplikovány různé hodnoty napětí. Jakmile dojde k rozpoznání správné hodnoty, je buňka připojena a odměří se hodnota napětí, která odpovídá bitové informaci. [32] [33]



Obrázek 16: Princip programování buněk 3D flash paměti [32]



## 5. SSD

Jelikož byl v předešlé kapitole kompletně popsán princip flash paměti, je již možné obsáhnout problematiku SSD disků ze všech ostatních pohledů. První záležitostí, kterou je třeba ujasnit, vychází z názvu této komponenty. Přestože SSD, ani již před ním používaný flash disk, neobsahují žádné rotující části kruhového tvaru, je v jejich názvu zahrnut termín „disk“. Je tomu tak nejspíše z důvodu zažitého faktu, že je toto slovo historicky úzce spjata s datovým úložištěm.

### 5.1. Druhy formátů

SSD disky lze samozřejmě dle různých kritérií, rozdělit na několik druhů. Tím nejvíce očividným hlediskem je jejich fyzické provedení. Klasičtější ze dvou hlavních formátů, které jsou k dispozici na trhu, je dvou a půl palcová varianta, vycházející z podoby plotnového pevného disku. Jelikož šlo zprvu o jediný způsob jakým SSD stávající a starší počítače vybavit, řešení muselo být kompatibilní s jejich tehdejším vybavením, proto byl zvolen formát již používaný pro magnetické disky. 2,5" varianta byla upřednostněna zejména z důvodu možného využití v noteboocích, a také protože tato velikost pro SSD jednoduše stačí. Později došlo k vytvoření nového druhu provedení, který se již nemusel držet zaběhlých standardů. Prvním, ale zároveň dnes již téměř zaniklým typem, byly disky osazující se do tzv. slotu mSATA, na základě čehož byl následně vytvořen v dnešní době stále populárnější formát M.2, který v současnosti představuje nejvhodnější variantu zapojení SSD, do běžně užívaných počítačů. V případě, že jím základní deska počítače není v základu vybavena lze dokoupit rozšiřující kartu AIC (Add-In Card) do slotu PCI-Express, která konektor M.2 obsahuje, nebo je SSD disk přímo její součástí. Používané formáty SSD disků lze vidět na obr. 17. [36] [37] [38]



Obrázek 17: Nabídka různých formátů SSD disků Samsung, zdroj: vlastní na základě [66] [67] [68]

## 5.2. Rozhraní

Stejně jako téměř každá počítačová komponenta, i SSD disk je vybaven rozhraním, kterým je připojen na základní desku. Jelikož jde stále o relativně nový typ hardwaru, není neobvyklé, že výrobci těchto zařízení dokáží v řádu několika málo let, vždy nový druh rozhraní z pohledu přenosových rychlostí saturovat.

Podobně jako v případě formátu, bylo i rozhraní SSD disků s jejich příchodem na trh přizpůsobeno dostupným technologiím, respektive lze říci, že v té době nově vzniklý standard SATA 3.0, byl již vývojově zaměřen právě pro tyto disky. Jelikož ale umožňoval i zpětnou kompatibilitu, měli majitelé základních desek s rozhraním SATA 2.0 příležitost nový typ hardwaru připojit, i když pouze s teoretickou přenosovou rychlostí 3 Gb/s. Ta byla roce 2009, právě díky příchodu třetí revize navýšena na dvojnásobek, a i když přišly další aktualizované verze, teoretická hranice 600 MB/s přetrvala pro rozhraní SATA až dodnes. První aktualizovaná verze 3.1, uvedená dva roky poté, přinesla kromě optimalizace spotřeby elektrické energie dvě vylepšení určené pro SSD disky. Tím prvním bylo uvedení v předchozí podkapitole zmíněného formátu mSATA, určeného zejména pro přenosné počítače. Zásadním ale bylo umožnění příkazu Trim, který je popsán v následující podkapitole. [39] [40]

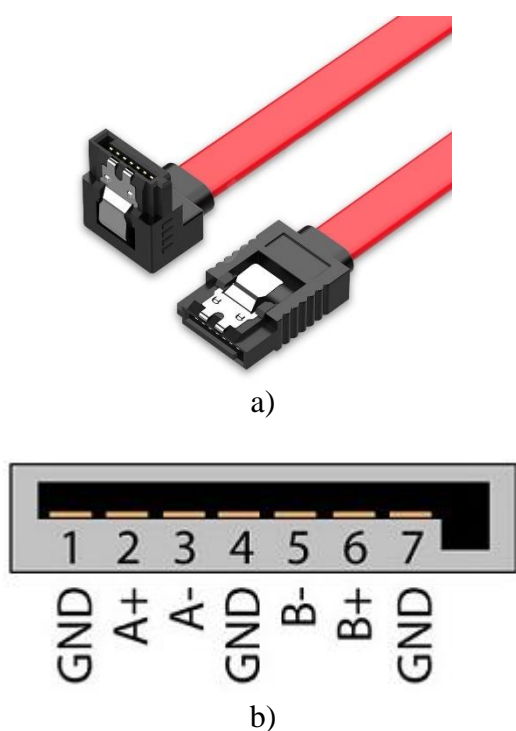
Opět s dvouletým odstupem mezinárodní organizace SATA-IO, představila verzi s označením 3.2, která opět znamenala jistý pokrok. První novou funkcionalitou byla tzv. SATA Express, která umožnila zařízení připojenému přes SATA konektor využít dvě linky rozhraní PCI Express 3.0. Teoretická datová propustnost se tedy zvýšila až na 2 GB/s. Klíčovým byl ovšem také přechod na formát M.2, což je stále aktuální a nejpohodlnější řešení, připojení SSD i co se týče rozhraní SATA. [41]

Verze 3.3 uvedená v roce 2016, nepřinesla žádná vylepšení určená pro SSD disky, hlavním posunem bylo až 25% navýšení kapacit plotnových disků, díky technologii SMR. Čtvrtá aktualizace umožnila předejít ztrátě dat zapsaným do Cache paměti SSD disku a také možnost monitorovat teplotu zařízení. V páté a zatím poslední revizi třetí generace rozhraní SATA, byla vylepšena práce s frontou dat. [42] [43] [44]

SATA je nástupcem původního rozhraní ATA/IDE, jež využívalo paralelního přenosu dat (proto lze někdy najít pod označením PATA). Písmeno S v názvu tedy indikuje přechod na sériový přenos. Samotný konektor zařízení je rozdělen na část pro data a část pro napájení, v případě formátu mSATA, či M.2 si pak uživatel musí dát pozor na správnou orientaci

samotného disku. Jedná-li se o SSD disk ve formátu 2,5" je ve většině případů nutné dokoupit datový SATA kabel, který výrobci do balení obvykle nezahrnují. Jeho zapojení, stejně jako kabelu pro napájení, díky tvaru podobajícímu se písmenu L, nelze splést.

Datový konektor je celkově tvořen sedmi piny, na okrajích a uprostřed se nachází kontakty pro uzemnění. Ty jsou pak od sebe odděleny vždy dvojicí pinů, přičemž jedna z nich slouží pro vysílání a druhá pro příjem signálu. Rozhraní SATA tedy podporuje plně duplexní přenos, což znamená, že připojené zařízení je schopné data vysílat a zároveň i přijímat v jednom okamžiku. Rozložení pinů a datový kabel lze vidět na obr. 18, tab. 3 popisuje funkci jednotlivých pinů. [45]



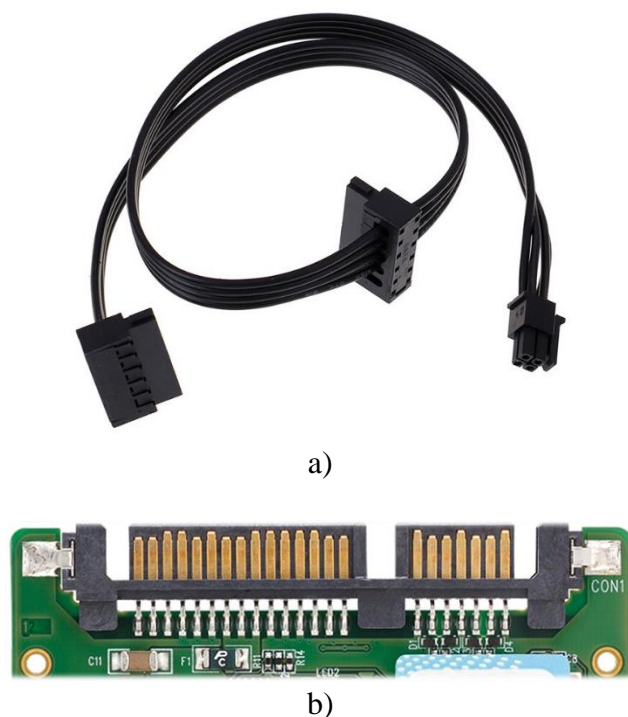
Pin	Funkce
1	Uzemnění
2	A+ (vysílání)
3	A- (vysílání)
4	Uzemnění
5	B- (příjem)
6	B+ (příjem)
7	Uzemnění

Obrázek 18: a) Datový SATA kabel, b) Datový konektor SATA [47] [48]

Tabulka 3: Popis funkcí jednotlivých pinů datového konektoru SATA [45]

Dvojice přenosových vodičů zde slouží jako ochrana před ovlivněním přenosu dat napěťovým šumem, způsobeným jinými elektrickými obvody v počítači. V obou dvojicích vždy jeden z vodičů vysílá, či přijímá signál s kladnou a druhý se zápornou polaritou napětí. Výsledný zpracovávaný signál je dán rozdílem těchto hodnot. Tato metoda přenosu se nazývá diferenční, díky tomu se nevrací žádný signál přes uzemnění obvodu a nedochází tak k rušení. Obě dvojice vodičů jsou navíc stíněné. [45] [46]

Konektor pro napájení je nejen z důvodu odlišení oproti datovému znatelně širší. Vede do něj 4 nebo 5 kabelů a skládá se z patnácti pinů. Disponuje prakticky všemi napěťovými úrovněmi, které jsou v počítači běžně používány. Každá napěťová úroveň je přivedena na trojici paralelních pinů, čímž je docíleno snížení impedance a navýšení celkového proudu z dané větve, kdy každý pin je schopen vést proud o velikosti 1,5 A. První trojice pinů je připojena na napětí 3,3 V, dva z nich se ale v současnosti nepoužívají a jsou rezervovány pro budoucí implementace. Třetí pin je od revize 3.3 využíván pro tzv. PWDIS (Power Disable) mód, který umožňuje kompatibilitu s rozhraním SAS. Tento pin je vždy stejně jako jeden z každé trojice využit k podpoře tzv. hot plugu, tedy možnosti připojení, či odpojení zařízení za chodu počítače. Piny 7 až 9 jsou napájeny pěti a poslední tři pak dvanácti volty. Jedenáctý pin je záležitostí pouze pevných disků, může a nemusí být využit pro roztočení ploten pouze v případě dotazu, což pomáhá snížit spotřebu elektrické energie. Zbývajících pět pinů slouží pro uzemnění s nízkou impedancí. Na obr. 19 je SATA rozhraní, dvou a půl palcového zařízení, vlevo část pro napájení a vpravo konektor pro data. Číslování pinů začíná vždy z pravé strany, z tohoto pohledu. Funkce jednotlivých pinů je popsána v tab. 4. [45]



Pin	Napětí	Funkce
1	3,3 V	Rezervováno
2	3,3 V	Rezervováno
3	3,3 V	HP, PWDIS
4	GND	Uzemnění
5	GND	Uzemnění
6	GND	Uzemnění
7	5 V	Hot Plug
8	5 V	-
9	5 V	-
10	GND	Uzemnění
11	GND	Reg. otáček
12	GND	Uzemnění
13	12 V	Hot Plug
14	12 V	-
15	12 V	-

Obrázek 19: a) Napájecí SATA kabel, b) Napájecí a datový konektor SATA na 2,5" zařízení [49] [50]

Tabulka 4: Popis funkcí jednotlivých pinů napájecího konektoru SATA [45]

Řadiče rozhraní SATA komunikují s operační pamětí počítače na úrovni sběrnice PCI, pomocí standardu AHCI (Advanced Host Controller Interface), který mimo jiné umožňuje přistupovat k zařízení softwarově. Oproti dříve používanému standardu IDE, poskytuje kromě

již zmíněného hot plugu, také využití funkce NCQ (Native Command Queuing), která zajišťuje zpracování několika příkazů současně. U pevných disků tím bylo dosaženo optimalizace dráhy čtecí hlavy, u SSD pak umožnění pracovat frontou dat až o 32 příkazech. [51] [52] [53]

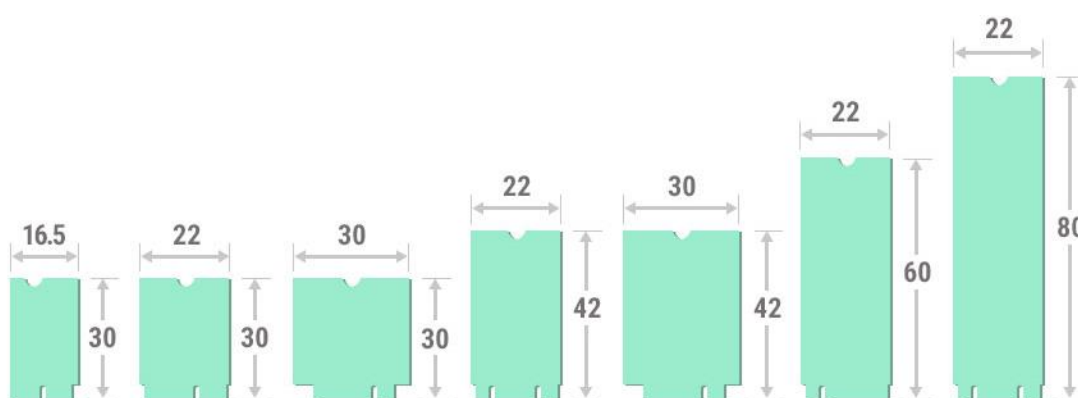
NVMe (Non-Volatile Memory express) uvedený v roce 2013, je již na SSD disky plně zaměřeným standardem, komunikující skrze sběrnici PCI-Express, nejnověji verze 4.0, na kterou je připravena specifikace NVMe 1.4. Kromě např. snížené přístupové doby, oproti rozhraní SATA, dokáže také pracovat s až neuvěřitelnými 65 535 (64K) frontami dat o 65 535 příkazech. Technologii NVMe lze využít pouze s konektory M.2, či U.2, nebo po připojení přídatné karty ve formátu AIC, přímo do slotu sběrnice PCI-Express, která je k vidění na obr. 20. [54]



Obrázek 20: AIC rozšiřující karta pro formát M.2 do slotu PCI-Express [55]

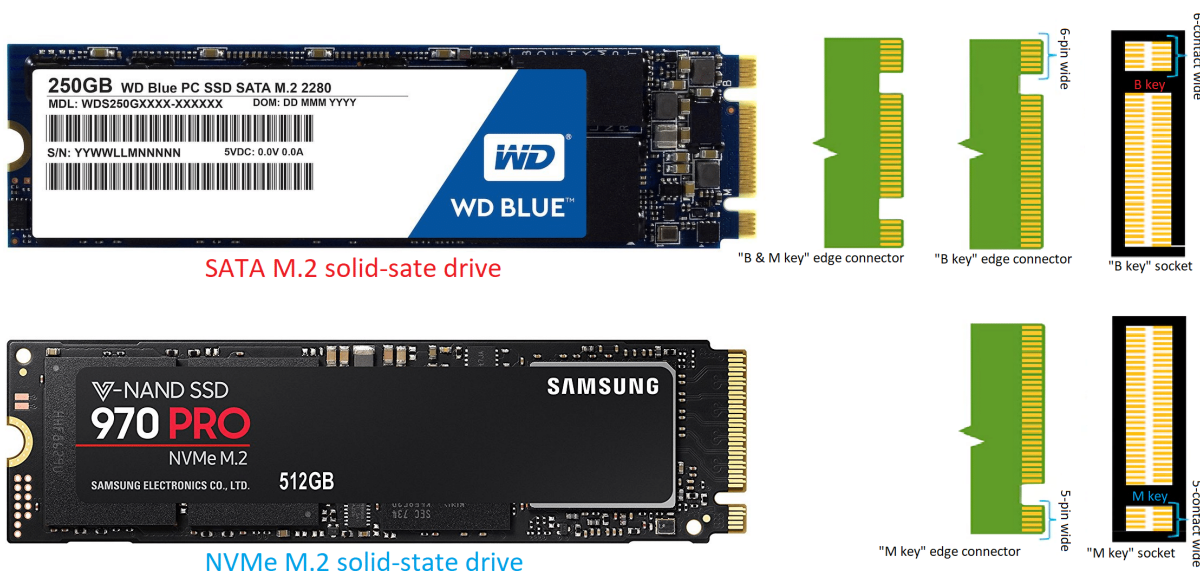
Název M.2 označuje jak formát disku, tak i příslušný konektor, který ale nepoužívá jen tento typ zařízení. Do tohoto slotu lze připojit také např. přídatné moduly, sloužící k bezdrátovým přenosům, jako jsou Wi-Fi, Bluetooth, WiWig, či NFC. Ačkoliv vychází z formátu mSATA a podporuje standard AHCI, v mnoha případech je využíván SSD s technologií NVMe a čtyřmi linkami PCI-Express. Ta v případě verze PCI-E 3.0, nabízí přenosové rychlosti s hranicí u teoretických 4 GB/s, čerstvě uvedená verze 4.0, pak dokonce dvojnásobek. Výrobci SSD disků a zejména jejich řadičů nějakou chvíli sice potrvá, než se této hranici přiblíží (v případě SATA a PCI-E 3.0 to byly od uvedení zhruba tři roky), přesto je ale SSD stále jediným typem hardwaru, který dokáže rychlosti sběrnice PCI-Express naplno využít. [38] [54] [56]

Koncepce konektoru i formátu M.2 byla od počátku směřována k co nejkompaktnějšímu řešení, proto má deska tištěného spoje nejčastěji se šířkou pouhých 22 mm, konektor umístěn přímo na své užší hraně. Na protější straně PCB je pak kruhový výřez pro šroubek, kterým se zařízení na základní desku připevňuje. Kvůli proměnné délce je pro něj na základní desce připraveno většinou závitů hned několik. Návrh formátu M.2 také umožňuje desku osazovat paměťovými čipy z obou stran, čímž lze dosáhnout vyšších celkových kapacit SSD disku. Neposlední výhodou oproti 2,5" diskům je rozhodně absence datového i napájecího kabelu. Jak lze vidět na obr. 21, M.2 SSD disky jsou vyráběny v různých velikostech a jejich značení je kombinací šířky a délky desky plošného spoje. [57]



Obrázek 21: Ukázka rozdílných velikostí M.2 SSD disků [58]

Samotný konektor je rozdělen na 75 dílků, s až 67 piny, které mají mezi sebou konstantní rozestup 0,5 mm. Zbývající počet dílků je vyhrazen pro výřez zvaný Key, (klíč) jehož pozice je proměnná vzhledem k podporovanému standardu, či rozhraní. Dva z nejpoužívanějších klíčů B a M, jsou znázorněny na obr 22. [59]



Obrázek 22: Klíče používané pro M.2 SSD disky [60]

Konektor umístěný na základní desce počítače, který je na obr. 22 v pravé části se nazývá Socket. NVMe SSD disky pasují pouze do konektorů s klíčem M. M.2 disky, podporující pouze rozhraní SATA mohou být do stejného socketu připojeny pouze v případě, mají-li výřez spolu s pro ně vyhrazeným místem B, současně i v oblasti M. Rozšiřující karty pro bezdrátová zařízení používají klíče A nebo E, všechny existující varianty jsou shrnuty v tab. 5. [59]

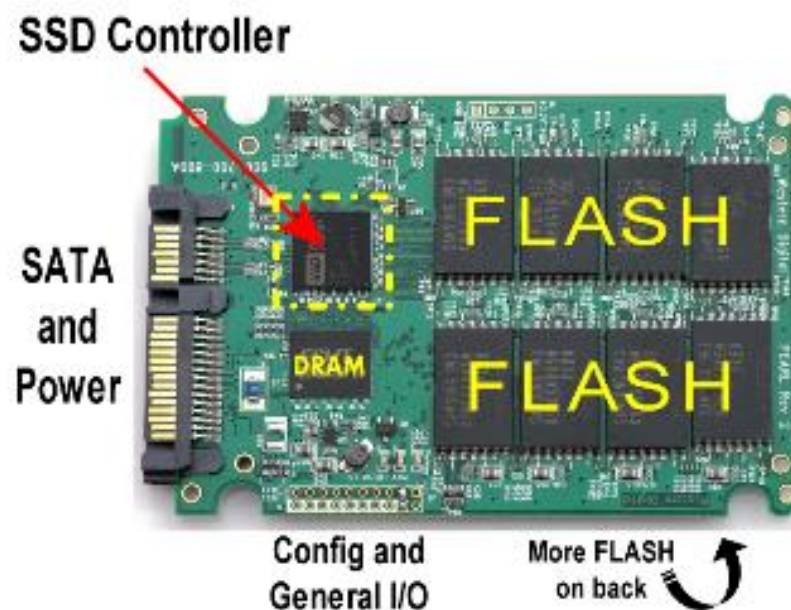
Klíč	Oblast	Rozhraní
A	8-15	2x PCIe x1 / USB 2.0 / I2C / DP x4
B	12-19	PCIe x2 / SATA / USB 2.0 / USB 3.0 / HSIC / SSIC / Audio / UIM / I2C
C	16-23	Rezervováno
D	20-27	Rezervováno
E	24-31	2x PCIe x1 / USB 2.0 / I2C / SDIO / UART / PCM
F	28-35	FMI
G	39-46	Není určeno pro M.2
H	43-50	Rezervováno
J	47-54	Rezervováno
K	51-58	Rezervováno
L	55-62	Rezervováno
M	59-66	PCIe x4 / SATA

*Tabulka 5: Přehled všech klíčů konektoru M.2 [61]*

S postupným nárůstem kapacit získávají SSD disky na smysluplnosti, i jako přenosná externí zařízení, vhodná nejenom k rychlému přenosu dat mezi dvěma počítači, ale i jako zálohovací médium. Jako používané rozhraní se kromě externího portu eSATA, jež bývá součástí zejména NAS serverů, nabízí všudypřítomné USB, které ale ve svých stále nejpoužívanějších variantách může být pro ty nejrychlejší SSD nedostačující. Situaci nepomáhá ani zmatečný způsob značení 3. generace této univerzální sériové sběrnice, kdy nejnovější verze 3.2, nabízí přenosové rychlosti od 5 Gb/s ve specifikaci Gen 1, až zhruba po 2,5 GB/s pro Gen 2x2. Jistější, avšak méně rozšířenou volbou tak je rozhraní Thunderbolt, jež používá konektor USB-C a nabízí přenosové rychlosti až 5 GB/s, což přesahuje hranice datové propustnosti SSD disků podporující PCI-E 3.0. Za podobný externí SSD disk si ale uživatelé oproti klasickým interním variantám notně připlatí. [62] [63] [64] [65]

### 5.3. Řadič

Minimálně stejně důležitou roli jako samotné paměťové buňky, má v SSD disku jeho řadič, někdy počestěním z anglického výrazu, nazývaný jako kontrolér. Již z tohoto lze odvodit, že jde o prvek, který řídí a usměrňuje veškerou činnost celého zařízení. Jeho hlavním úkolem je zajišťovat veškerou komunikaci SSD disku, skrze jeho rozhraní s počítačem. Neméně důležitou činností řadiče je různými metodami maximalizovat jeho životnost a spolehlivost. Samotné schopnosti řadiče disku jsou pak určující, co do výkonnosti a celkové kvality konkrétního modelu SSD. Jak lze vidět na obr. 23, řadič se na SSD osazuje v podobě čipu a je umístěn mezi konektorové rozhraní a paměťové čipy NAND. [28] [69]

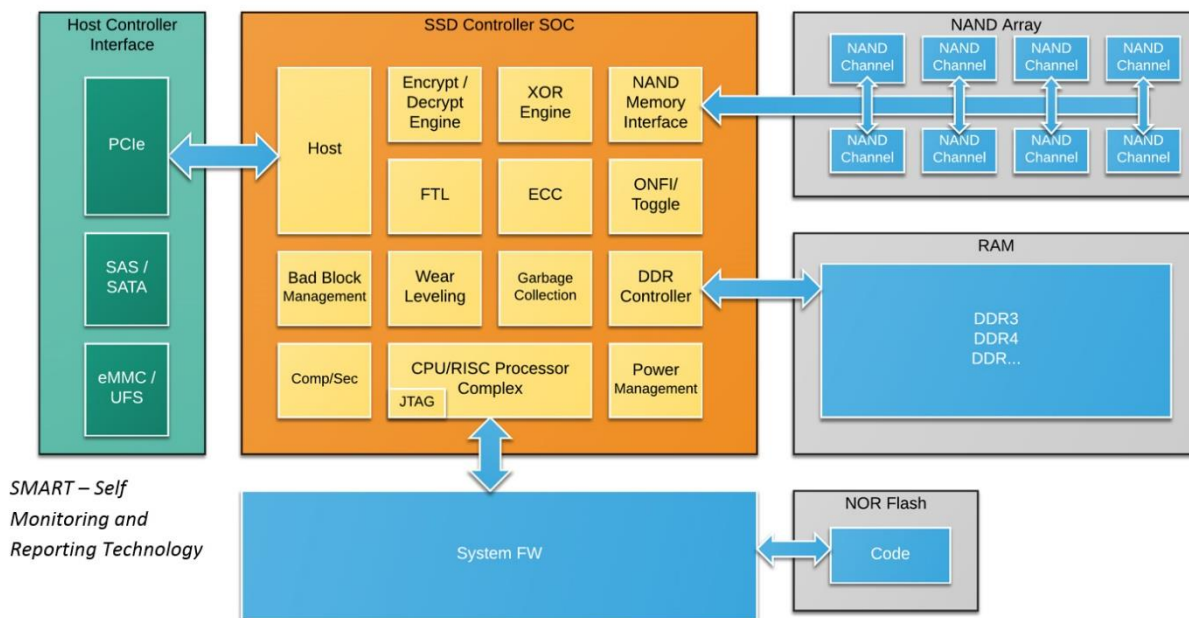


Obrázek 23: Rozložení prvků 2,5" SSD disku [70]

Jádrem samotného řadiče je procesor architektury ARM s redukovanou instrukční sadou, jenž řídí všechny funkce a menší řadiče, které komunikují s každou částí SSD disku jednotlivě. Kromě pohybu dat mezi flash pamětí a vstupně výstupním rozhraním, samostatným řadičem disponuje i pomocná paměť DRAM nebo SRAM, která v SSD plní funkci tzv. SLC Cache. [71] [72] [73] [74] [75] [76]



V té je primárně uložena mapovací tabulka, která slouží k uchování fyzických adres, odpovídajících logickým adresám, pomocí kterých je k datům z vnějšku přistupováno. Tato funkce se nazývá Flash Transition Layer. Jelikož je ale RAM volatilní paměť, před vypnutím počítače, nebo před očekávaným výpadkem proudu, který je zaznamenán detektorem poklesu napájení, musí být tato tabulka přesunuta do flash paměti. Struktura nejen řadiče, ale celého SSD disku, je popsána na obr. 24. [71] [72] [73] [74] [75] [76]



Obrázek 24: Struktura SSD disku [73]

Součástí funkce FTL jsou i algoritmy sloužící k prodloužení životnosti SSD disku. První z nich, nazývaný Wear Leveling, má za úkol zajišťovat rovnoměrné opotřebení všech paměťových buněk. Při každém zápisu do zvoleného paměťového bloku je software přinucen data zapsat do bloku jiného. Větší smysl tento princip dává, když si člověk představí, jak flash paměť funguje. Před každým zápisem se celý zvolený blok musí nejprve vymazat a po stránkách, stará a nová data znovu zapsat. Pokud by se toto stávalo příliš často v rámci jednoho bloku, došlo by k poškození jeho paměťových buněk mnohem dříve, než u těch ostatních. [28] [77]

Výrobci řadičů používají dva druhy tohoto algoritmu, statický a dynamický. K pochopení jejich činnosti je zapotřebí definovat tři druhy bloků. Prvním z nich je blok prázdný, druhým je tzv. statický, tedy takový, ve kterém jsou uložena data, ale zapisuje se do něj pouze zřídka. Třetím je pak blok často přepisovaný. Statický algoritmus na rozdíl od dynamického využívá všech druhů bloků, včetně bloků statických, které neustále přesouvá a díky tomu je může udržovat rovněž rovnoměrně opotřebované. Nevýhodou tohoto přístupu však je, že neustálým

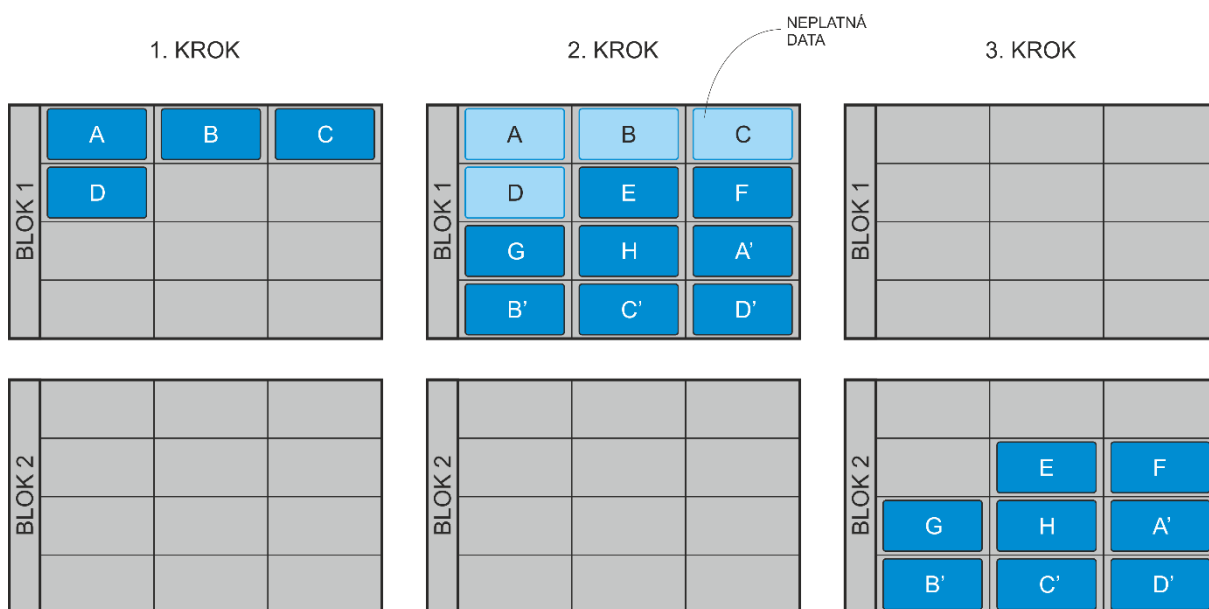
přepisováním těchto statických dat dochází k navyšování počtu P/E cyklů, což se na životnosti disku může negativním způsobem podepsat. Stále je ale považován za lepší způsob jejího prodloužení, než v případě dynamického algoritmu, který není tak důsledný. Jeho výhodou je ale jednoduchost, která umožňuje o něco rychlejší zápis. [28] [77]

Dříve zmiňovaná pomocná paměť RAM je zásadním prvkem algoritmu zvaném External Data Buffering. Jeho cílem je redukovat počet zapisovacích cyklů na minimum tím, že namísto několika menších zápisů přímo do paměti NAND, se data nahromadí právě do paměti SLC Cache a až z té je následně proveden jeden dlouhý zápis. Implementace paměti RAM, která může být součástí čipu řadiče, nebo častěji umístěná mimo něj, napomáhá také rychlosti, jakou SSD disk data zapisuje. Nejefektivnější zápis probíhá v případě, kdy je optimalizován na velikost stránky paměti, která je pro různé modely SSD odlišná. Řadič proto data dle toho v paměti RAM uspořádává. Stejně jako v případě mapovací tabulky je nutné zajistit, aby v případě výpadku elektrického proudu, baterie, superkondenzátor, nebo několik tantalových kondenzátorů, napájeli RAM a umožnili tak bezpečně data do paměti NAND zapsat. [77]

Pod zkratkou ECC se skrývá další z algoritmů zodpovědných za delší životnost SSD disků. Error Code Correction jak sám název napovídá, pomáhá opravovat malé (měkké) chyby způsobené rušením a slabým napěťovým signálem. Větší (tvrdé) chyby, které dokáže redukovat, mohou vznikat z důvodu opotřebení paměťových buněk. Ty spočívají v problému, kdy bit paměťové buňky zůstane zaseklý v jednom stavu, což následně zvyšuje frekvenci výskytu chyb měkkých. Každý ECC algoritmus dokáže ale opravit pouze určité množství měkkých a tvrdých chyb, přičemž výrobci udávaná životnost v podobě počtu P/E cyklů, či TBW, odpovídá době vzniku první tvrdé chyby. Dobu, po které dojde k další podobné chybě na té samé stránce paměti, přitom není možné přesně určit. Jisté je však, že v praxi to trvá mnohem déle, než udává výrobci specifikovaný parametr. Error Correction Code tedy nejenže významně prodlužuje SSD diskům jejich životnost, ale jeho implementace mimo paměťový čip, také činí z NAND flash jednu z nejlevnějších pamětí na trhu. [77]

Název algoritmu Reduce Write Amplification by se dal českým souslovím popsat jako redukce nevyžádaných zápisů. Ty vznikají při přesunech dat ze dvou sousedních, řídky zaplněných bloků do jiného, jediného bloku. Cílem tohoto algoritmu je pak minimalizovat počet, nebo dopad těchto operací. Jedním ze způsobů, jak toho docílit je zapisovat data do sekvenčních adres a porovnat je až v době nečinnosti disku. Odlišným používaným přístupem je všechna zapisovaná data předem komprimovat a tím snížit počet zapisovacích cyklů. [77]

Všimavější uživatelé se možná někdy pozastavili nad netradiční nabídkou kapacit většiny SSD disků, kdy například namísto očekávaných 512 GB se na trhu objevují modely s kapacitou 500, či dokonce 480 GB. Jedná se o mechanismus zvaný Over Provisioning, který má opět za cíl prodloužit životnost disku, avšak za cenu nižší nabízené kapacity. Zbývající, pro uživatele nepřístupný prostor, je tvořen pouze z prázdných bloků, které slouží jako pomocné úložné místo pro Wear Leveling a také pro algoritmus zvaný Garbage Collection. Ten, jak název napovídá, má za úkol shromažďovat data z tzv. neplatných buněk. Celý proces je popsán následujícím odstavci, pro ilustraci slouží obr. 25. [77] [78] [79] [80] [81]



Obrázek 25: Popis algoritmu Garbage Collection, zdroj: vlastní na základě [79]

Neplatné buňky vznikají v případě úpravy (přepisu) dat v nich uložených, na obr 25. jsou to stránky A až D. Ty jsou zapsány znovu a označeny jako A' až D'. Po zaplnění stránek E až H je zaplněn i celý blok, z důvodu již neplatných dat v prvních čtyřech stránkách. Nyní je aktivován algoritmus GC, který validní data zapíše do nového bloku a ten stávající celý vymaže, čímž mimo jiné dochází k dříve zmiňovanému nevyžádanému zápisu. Provázanost jednotlivých algoritmů dokládá fakt, že GC z části plní funkci algoritmu Wear Leveling. [79]

Over Provisioning kromě životnosti SSD disku napomáhá také zvýšení přenosových rychlostí. Výrobci jeho velikost nastavují u běžných modelů v řádech jednotek procent, u modelů určených pro datové servery, pak nechávají tento prostor násobně větší. Jeho velikost lze ale i jednoduše navýšit zkrátka tím, že určitou část disku uživatel nechá nezformátovanou. [77] [78]

Další nabízené životnost prodlužující funkce řadičů, jsou již odvislé na konkrétním výrobci, či modelu. Jednou z nich může být funkce jakési zpětné vazby, kterou řadič dostává o výdrži jednotlivých paměťových bloků. Tím tak s nimi může lépe hospodařit a do těch houževnatějších zapisovat častěji, čímž opět může docílit značného navýšení životnosti. Jiná vylepšení v oblasti nakládání s životností SSD disku, jsou již závislá na vztazích mezi výrobcí paměťových čipů, řadičů a disků samotných, což v praxi bývají tři odlišné firmy. Ty jsou shrnuty v následujících tabulkách (tab. 6a, 6b a 6c). [77]

SSD		Řadiče		Paměťové čipy	
1	Samsung	1	Phsion	1	Samsung
2	Western Digital	2	Silicon Motion	2	Kioxia (Tohsiba)
3	Kingston	3	Samsung	3	SanDisk (WDC)
4	Corsair	4	Kioxia (Toshiba)	4	Micron
5	ADATA	5	SanDisk (WDC)	5	SK Hynix
6	Kioxia (Toshiba)	6	Marvell	6	Intel*
7	Seagate	7	InnoGrit		
8	Crucial				
9	Gigabyte				
10	Patriot				
	...				

a)

b)

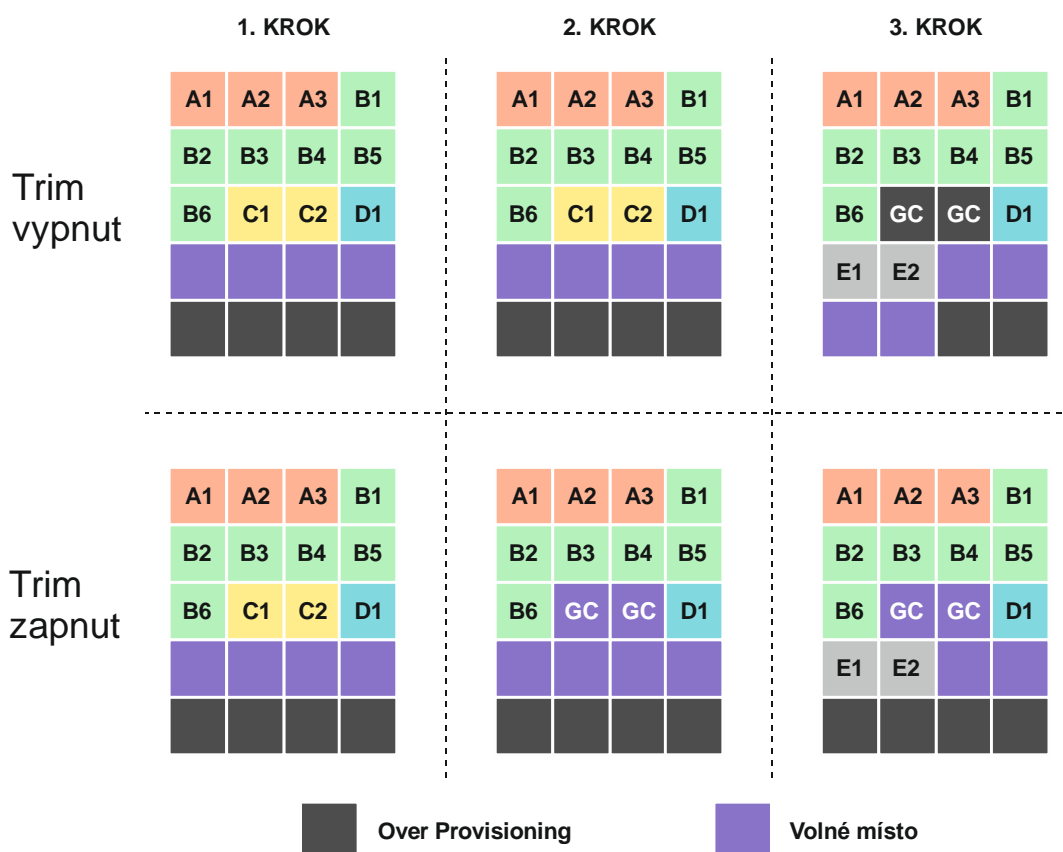
c)

*\*Divize NAND paměťových čipů Intelu byla v roce 2020 zakoupena společností SK Hynix. [82]*

Tabulka 6: Výrobci a) SSD disků, b) řadičů, C) paměťových čipů [83] [84] [85]

Zatímco počet výrobců konečných produktů v podobě SSD disků, čítá téměř dvě stě společností, tak těch, které vyrábí jejich hlavní komponenty je jen omezené množství. Důvod je jednoduchý, poskládat SSD z částí, nakoupených od třetích stran je o poznání jednodušší a také méně nákladné, v porovnání se složitou výrobou a nákladným vývojem. Z tab. 6, si lze všimnout, že pouze společnosti Samsung, Kioxia (dříve Toshiba) a Western Digital, který dříve odkoupil SanDisk, jsou jedinými značkami, které do svých finálních produktů implementují obě nejdůležitější komponenty vlastní výroby. [85]

Pro uživatele pravděpodobně nejznámější specifickou funkcí SSD disků je příkaz Trim. Jedná se opět o další způsob, jak u těchto úložišť zlepšit výkonnost a prodloužit jejich životnost. Jeho zavedení opět souvisí s pro NAND typickou obtíží, že přepis dat musí předcházet jejich výmaz. Při tom, jak již bylo dříve zmíněno, jsou všechna data, včetně již upravených, přepsána do jiného bloku a ten starý je naplánován k výmazu. Problém však tkví v komunikaci, mezi softwarem a řadičem SSD disku, který výmaz daného bloku neprovede do chvíle, kdy je to již nezbytně nutné. Ta ale nastává až v době, kdy místa na SSD disku ubývá a stejně tak i prázdných bloků, čímž musí docházet k častějšímu mazání těch s nevalidními daty a tím i ke značnému zpomalení čtení i zápisu. Operační systém spuštěním příkazu Trim, tak dává řadiči SSD disku najevo, které bloky jsou nevyužívané, a proto určené k vymazání s mnohem větším předstihem. Jak je naznačeno na obr. 26, včasné uvolnění prostoru může navíc využít algoritmus Garbage Collection, který, tak ušetří aktuální místo vyhrazené pro Over Provisioning. Průběžné mazání bloků, také pomáhá snížit počet zápisů a tím i hodnotu Write Amplification. [79] [86]



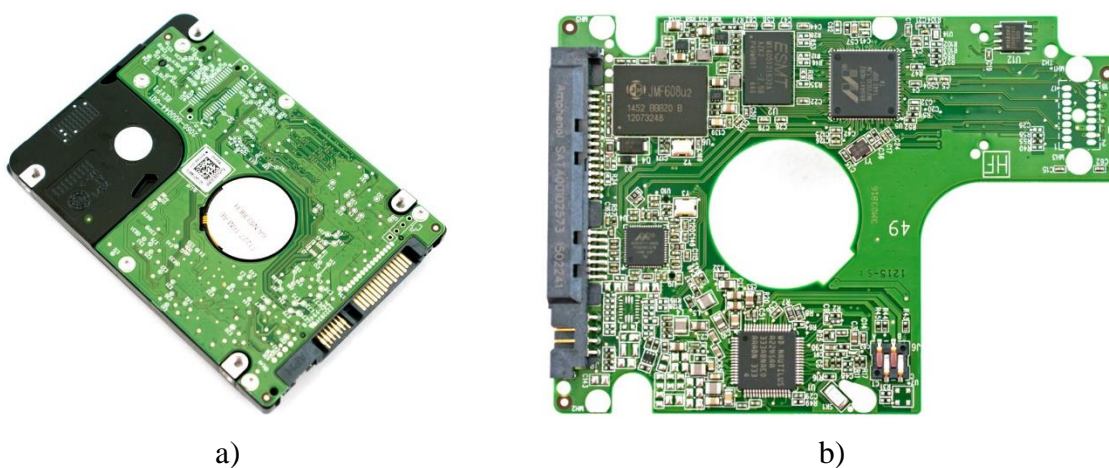
Obrázek 26: Popis funkce příkazu Trim, zdroj: vlastní na základě [79]

Bloky označené jako A1 až D1 v prvním kroku na obr. 26, představují nově zapsaná data. Uživatel chce přepsat data označená jako C1 a C2, ty jsou tedy ve druhém kroku smazány a ve třetím zapsány z pohledu OS na to samé místo, z pohledu fyzického umístění jsou ale zapsány

do nového bloku. Rozdíl mezi vypnutým a zapnutým příkazem Trim je v tom, že ve druhém kroku jsou při aktivování příkazu Trim smazaná data ihned označena za neplatná a připravena pro algoritmus Garbage Collection, který v tomto případě nemusí využít prostor vyhrazený pro Over Provisioning. [79]

## 5.4. SSHD

V rané fázi vývoje, kdy SSD disky neoplývaly dostatečně velkou kapacitou a jejich poměr ceny za gigabajt nebyl příliš výhodný, představila v roce 2013 společnost Seagate, hybridní disk spojující SSD a HDD v jedno zařízení. 8GB paměť NAND přitom měla sloužit jako paměť Cache, pro pevný disk běžně terabajtových kapacit. Do flash paměti se ukládají ta nejčastěji používaná data, ke kterým tak lze nejrychleji přistoupit. Hybridní disk svou konstrukcí nepředstavuje nic neočekávaného, je tvořen částmi běžného pevného disku a deskou plošného spoje, s řadičem a NAND paměťovými čipy SSD, viz obr. 27. [87] [88] [89]



Obrázek 27: SSHD disk a) pohled po odstranění krytu, b) deska plošného spoje [90]

SSHD tak v obou spotřebitelsky nejdůležitějších parametrech, tedy v ceně a výkonu, představuje jakýsi mezistupeň obou technologií. Největší smysl tento produkt dával zejména pro uživatele přenosných počítačů, do kterých se obvykle, při zachování DVD mechaniky vešel pouze jeden z disků. I u těch je ale dnes pravděpodobnější narazit na samotný HDD, SSD nebo jejich kombinaci. Z dnešního pohledu tak lze SSHD brát jako slepou vývojovou větev, kterou některé společnosti vyplnily díru na trhu v době, kdy cena za gigabajt kapacity SSD disku byla oproti současné situaci poměrně vysoká. [87] [88] [89]

## 6. Praktická část

Praktická část této diplomové práce je zaměřena na dlouhodobé testování vybraných modelů SSD disků při použití v běžném počítači. Hlavním sledovaným zájmem je jejich životnost, ale prověřeny budou také přenosové rychlosti v několika různých směrech, které budou měřeny za pomoci specializovaných softwarů, při syntetických a běžných uživatelských testech.

### 6.1. Testovací sestava

I když v případě testování paměťových úložišť nehraje většina komponent počítače žádnou roli, bývá zvykem při každém důkladném hardwarovém testu tuto sestavu uvést. V tomto případě nás bude zajímat především základní deska a její konektorové vybavení. Ta má k dispozici šest SATA portů a rovněž dva M.2 sloty s podporou standardu NVMe. Počítač, na kterém bude testování probíhat, byl sestaven na konci roku 2018 a používá operační systém Windows 7. Konkrétní modely komponent testovací sestavy jsou uvedeny v tab. 7.

Komponent	Konkrétní model v testovací sestavě
Základní deska	Gigabyte Z370 HD3P
Procesor	Intel Core i7-8700
Operační paměť	Corsair Vengeance DDR4 2x8GB 3466MHz CL16
Zdroj	Corsair CS750M, 750W
Grafická karta	MSI GeForce GTX 1070 ARMOR 8G OC GDDR5
HDD	WD Blue 2 TB, 64 MB, 5400 rpm
SSD	Crucial MX300 2,5" SATA, 275GB
Skříň	Zalman Z3 Plus

*Tabulka 7: Výpis komponentů testovací sestavy*

## 6.2. Vybrané modely SSD disků

Cílem při výběru konkrétních modelů SSD disků bylo co nejrozmanitěji obsáhnout současnou nabídku trhu, při zvoleném počtu čtyř zástupců. Hlavním ohledem byla paměťová kapacita disku, která byla stanovena na hodnotu okolo 500 GB. Dalším hlediskem bylo rozhraní, kdy dva z vybraných disků využívají technologii NVMe, potažmo konektor M.2 a zbylé dva pak sběrnice SATA 6 Gb/s. Při výběru bylo dbáno i na rozmanitost v oblasti paměťových buněk, ačkoliv drtivá většina současných SSD disků, které lze na trhu pořídit, využívá paměťových buněk 3D TLC, podařilo se do testu vybrat i jednoho zástupce s buňkami QLC. U ostatních třech disků byla kritériem, alespoň odlišnost výrobců samotných buněk. Zastoupeny jsou rovněž minimálně tři odlišné radiče, kdy u čtvrtého není výrobce ani jednoho z obou klíčových částí znám. Fotografie balení vybraných modelů, včetně pořízeného příslušenství je k vidění na obr. 28.



Obrázek 28: Pořízené SSD disky, včetně nezbytného příslušenství



Kromě vybraných modelů SSD disků, lze na obr. 28 zahlédnout i dva datové SATA kabely a rámeček pro dva 2,5" disky určený pro montáž do 3,5" pozice. Prvním a zároveň nejlevnějším testovaným modelem je SATA SSD, s řadovým názvem BarraCuda Q1, od společnosti Seagate. Jedná se o model nižší střední třídy, a jelikož je z vybraných modelů nejnověji uvedený na trh (květen 2020), není o něm k dispozici mnoho informací. O něco dražší, již zavedený model KC600, od firmy Kingston, by měl představovat nejvyšší kvalitu v oblasti SATA SSD, avšak za cenou, za kterou lze již pořídit ne jeden model s technologií NVMe. Kingston je vybaven 96vrstevnými paměťmi od Micronu a podporuje pokročilé šifrování dat. Pro svou vyšší spotřebu při maximální zátěži, není však doporučován do notebooků, u kterých tím snižuje výdrž na jedno nabití baterie. Všechny vybrané modely lze detailněji vidět na obr. 29. [56]



Obrázek 29: Rozbalené modely SSD disků

Levnějším modelem v kategorii zvolených NVMe disků je model Blue SN550 od společnosti Western Digital. Namísto SSD disky obvykle využívané DRAM, je tento typ vybaven několika megabajty SRAM, implementované přímo do řadiče vlastní výroby. Paměťové buňky jsou rovněž 96vrstvé, avšak od společnosti SanDisk, kterou ale před pár lety WD odkoupil.

Nejvýkonnějším a nejdražším modelem v testu by měl být Viper VPN100 od Patriotu. Disk na první pohled zaujme robustním, pasivním chladičem a výrobcem deklarovanou 512GB DRAM, díky které by měl udržet konstantní rychlost zápisu, i při téměř úplném zaplnění paměti. Použité paměťové buňky jsou opět typu TLC, v tomto případě od společnosti Toshiba. I přes nejvyšší cenu z vybraných modelů poskytuje výrobce pouze tříletou záruku, hodnota udávané výdrže je však ze všech čtyř disků nejvyšší. Všechny parametry, které výrobci o svých produktech uvádějí v katalogových listech, jsou shrnuty v tab. 8. [56] [30] [95]

Model Parametr	Seagate Barracuda Q1	Kingston KC600	WD Blue SN550	Patriot Viper VPN100
Kapacita [GB]	480	512	500	512
Výrobce paměťových buněk	?	Micron	SanDisk	Toshiba
Typ paměťových buněk	3D QLC	3D TLC	3D TLC	3D TLC
Řadič	?	Silicon Motion SM2259	WD	Phison E12
Max. sekvenční čtení [MB/s]	550	550	2 400	3 300
Max. sekvenční zápis [MB/s]	500	520	1 750	2 200
Max. náhodné čtení [4K, IOPS]	?	90 000	300 000	700 000
Max. náhodný zápis [4K, IOPS]	?	80 000	240 000	480 000
TBW [TB]	110	300	300	800
Záruka	3 roky	5 let	5 let	3 roky
Pořizovací cena	1 397 Kč	1 599 Kč	1 628 Kč	1 899 Kč

Tabulka 8: Výrobci udávané parametry zvolených modelů SSD disků [31] [56] [105] [106] [107] [108]

### 6.3. Metodika testování

Po výběru a zakoupení bylo prvním úkolem upevnit oba SATA SSD disky do 2,5palcového hliníkového rámečku, což lze vidět na obr. 30a. Tento rámeček slouží pro usazení do 3,5" pozice, k tomu aby disky byly bezpečně upevněny v počítačové skříni. Dalším krokem samozřejmě bylo SSD disky umístit do počítačové skříně, SATA disky připojit ke sběrnici a na napájení, NVMe disky pak zasunout do M.2 slotu a upevnit šroubkem, zde pro ilustraci slouží obr. 30b.

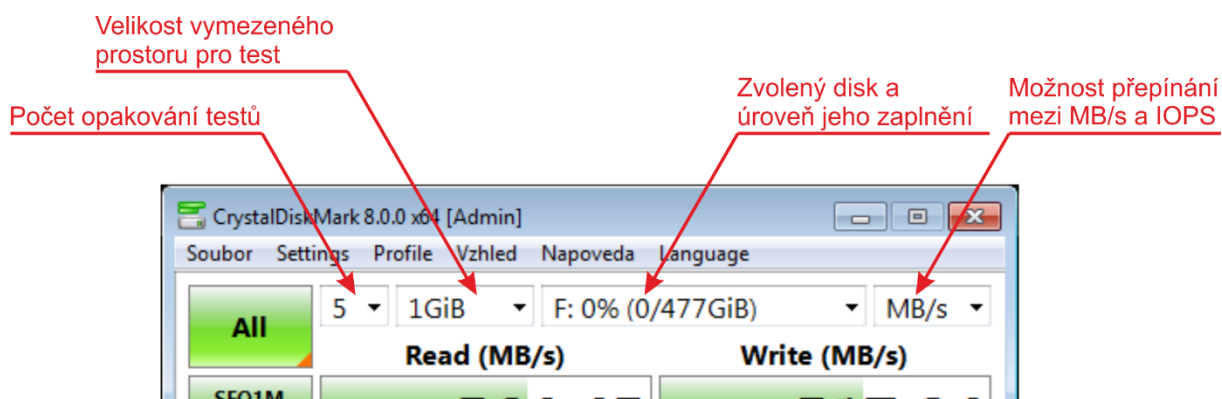


Obrázek 30: Umístění SSD disků do počítačové skříně a) připojení, b) náhled montáže do rámečku

Po spuštění počítače byl na discích vytvořen vždy jeden GPT oddíl a ten byl poté zformátován na souborový formát NTFS. Následně byly na oficiálních stránkách výrobců vyhledány a nainstalovány aplikace pro správu disků, aby bylo možné zaktualizovat jejich firmware.

### 6.3.1. Zadávané a měřené parametry

Před zahájením samotných testů je důležité specifikovat jednak parametry, které se před jejich spuštěním zadávají, ale také samozřejmě ty, jež budou výstupem měření. Prvním parametrem, který se třeba před spuštěním testu ve všech použitých programech zvolit, je velikost prostoru, který bude pro test na disku vyčleněn. Tímto způsobem je možné monitorovat výkon disků, při zaplnění určité části jejich kapacity a případně tak i zaplnit jejich SLC Cache. Nejčastěji lze tuto hodnotu nastavit v rozmezí od jednoho do 32 gigabajtů. Dalším parametrem, který obvykle lze nastavit, je velikost fronty dávkování souborů. Ta je nejčastěji označována jako QD (Queue Depth), nebo také Thrd (Thread). Při běžné uživatelské práci prakticky nedochází k frontám větším, než je hodnota QD5, proto v případě, že program toto nastavení umožňuje, bývá nejčastěji měřeno s frontou o hodnotě QD4. Výsledky testů mohou být rovněž ovlivněny nastavením úrovně komprese dat. Tímto parametrem lze specifikovat typ dat, jejichž čtení a zápis bude měřen. V testech jsou pak obvykle používány stoprocentně zkomprimovaná, případně data se 46procentní kompresí, které reprezentují soubory běžně používaných aplikací. Posledním hlavním parametrem, kterým lze měření ovlivnit, je počet opakování testů. Některé programy poté zobrazí maximální dosažené hodnoty, jiné pak průměr z naměřených výsledků. Příklad možnosti volby parametrů je možné vidět na obr. 31. [94]



Obrázek 31: Program CrystalDiskMark - Možnosti volby parametrů testu

Mezi hlavní dva parametry, které nás u výsledků měření nejvíce zajímají, patří jednoznačně přístupová doba a také rychlost čtení a zápisu dat, kterou je nutné rozdělit do několika částí. Parametrem, kterým se výrobci SSD disků nejvíce chlubí, je rychlost sekvenčního čtení a zápisu relativně objemných dat (obvykle 1 megabajt a více). Tato strategie je zcela pochopitelná, jelikož je tak možné zákazníky nalákat poměrně vysokými čísly. Pro většinu běžných uživatelů jsou ale méně důležitá, jelikož se jedná o data, která není zapotřebí číst a zapisovat tak často. Zařadit mezi ně můžeme např. obrázky a videa s vysokým rozlišením. Těchto udávaných

rychlostí pak dosáhneme pouze v případě, kdy data přesouváme v rámci jednoho SSD, nebo mezi dvěma takovými disky. V případě čtení/zápisu dat, z nebo na magnetický disk, sekvenční rychlost rapidně klesá. Proto pokud má SSD disk sloužit hlavně pro zrychlení systému je třeba hledět na rychlost čtení tzv. náhodných (random) souborů o malé velikosti. Právě především pouze čtení, jelikož je důležitější, než zápis, který provádíme velmi zřídka, např. při instalaci softwaru. Čtení naopak probíhá prakticky neustále, nejčastěji pak souborů o přibližné velikosti 4 KB, jež jsou proto také jedním z hlavních parametrů měření.

Parametr IOPS (Input/Output Operations Per Second) udává, kolik operací je SSD disk schopen vykonat za sekundu. Prakticky lze tuto hodnotu i vypočítat, když podělíme rychlost čtení, nebo zápisu velikostí souboru, pro který byla tato rychlost změřena. Pokud je tedy SSD disk schopen přečíst soubor o velikosti 1 MB rychlostí 500 MB/s, vykoná přitom 500 IOPS. Jak si lze všimnout v tab. 8, výrobci hodnoty IOPS používají právě ve spojitosti se soubory o velikosti čtyř kilobajtů. Opět v tom lze najít marketingový tah, kdy hodnota několika desítek tisíc IOPS vypadá na papíře lákavěji, než třeba 20 MB/s.

Posledním již zmíněným parametrem je přístupová doba, která byla popsána i v dřívějších kapitolách. Jedná se o dobu, za kterou procesor dokáže k datům přistoupit, což ovlivňuje právě typ použité paměti. Jelikož SSD disky na rozdíl od HDD nedisponují žádnými pohyblivými částmi, je jejich odezva oproti nim blesková. V praxi také platí, že rychleji lze přistupovat k menším souborům. Opět je třeba rozlišovat mezi přístupovou dobou při čtení a při zápisu dat, kdy stejně jako při přenosových rychlostech, má čtení větší důležitost. Některé měřicí programy vyhodnocují všechny tyto zmíněné parametry, pro různé velikosti souborů a následně z nich vypočítávají skóre zvlášť pro čtení a zápis. [94]

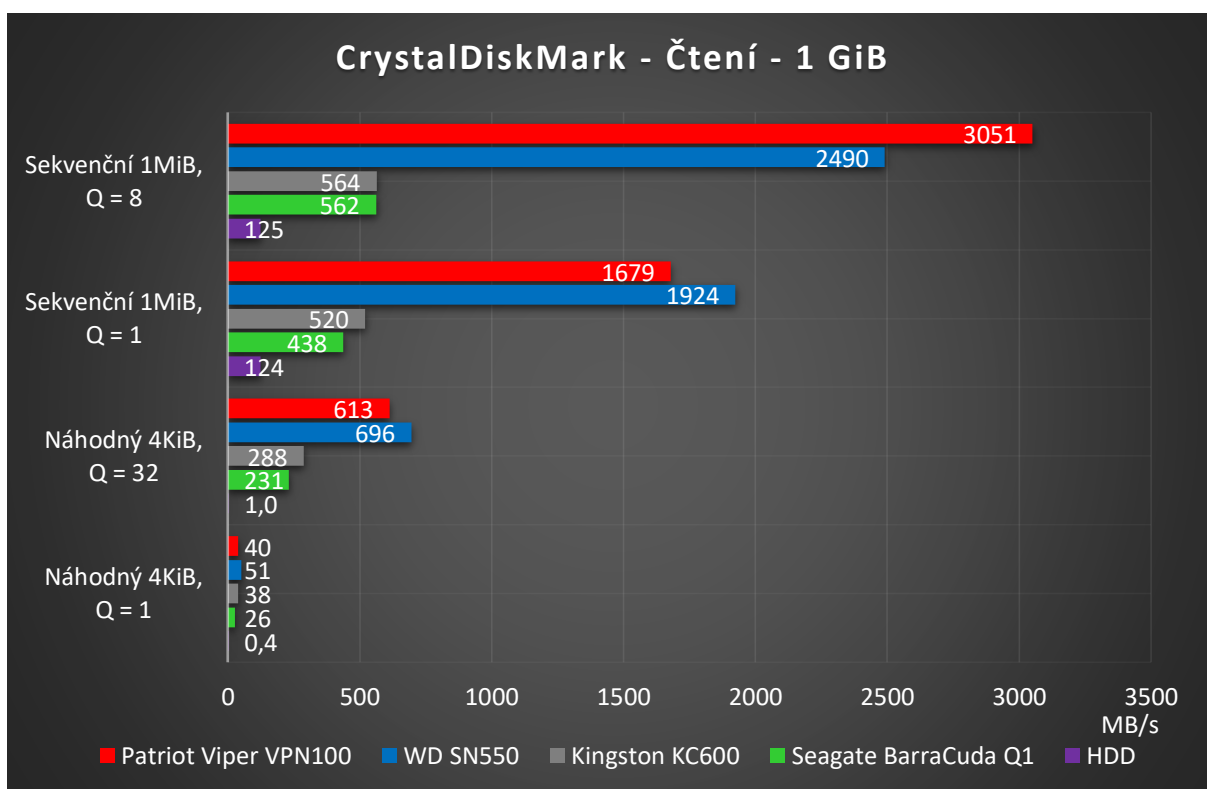
Při řešení problematiky datových úložišť je také důležité ujasnit si rozdílnost dvou používaných soustav předpon jednotky bajt, které se mnoha lidem pletou. V rozporu je totiž klasická SI stupnice, používající mocnin  $10^x$  a binární soustava počítající s  $2^x$ . Je tedy nutné vědět, že jeden kilobajt (1 KB) je roven 1 000 bajtů, tedy  $1 \cdot 10^3$  B. Kdežto jednotka KiB (kibibajt), představuje  $1 \cdot 2^{10}$  bajtů, tedy 1024 B. Zvláštním způsobem s těmito jednotkami pracuje i operační systém Windows a mate tím i méně znalé uživatele, kteří se diví, že po zakoupení disku o celkové kapacitě 512 GB, mají k dispozici pouze něco málo přes 476 GB. Jedná se však pouze o převod mezi GB a GiB, jednotku gibibajt ale v systému Windows nikde nenajdete. [96]

## 6.4. Testování

Testování bylo zahájeno se zcela novými SSD disky, u kterých byl nainstalovaný aktuální firmware. Pro porovnání byly počáteční testy v některých měřicích programech provedeny také u klasického pevného disku, uvedeného v tab. 7. Ten se svými 5 400 otáčkami za minutu sice nepředstavuje výkonnostní strop HDD, ale jedná se o jeden z nejběžnějších modelů v této kapacitě a rozdíl v rychlosti oproti modelu se 7 200 rpm, by neměl být značný.

### 6.4.1. Syntetické testy

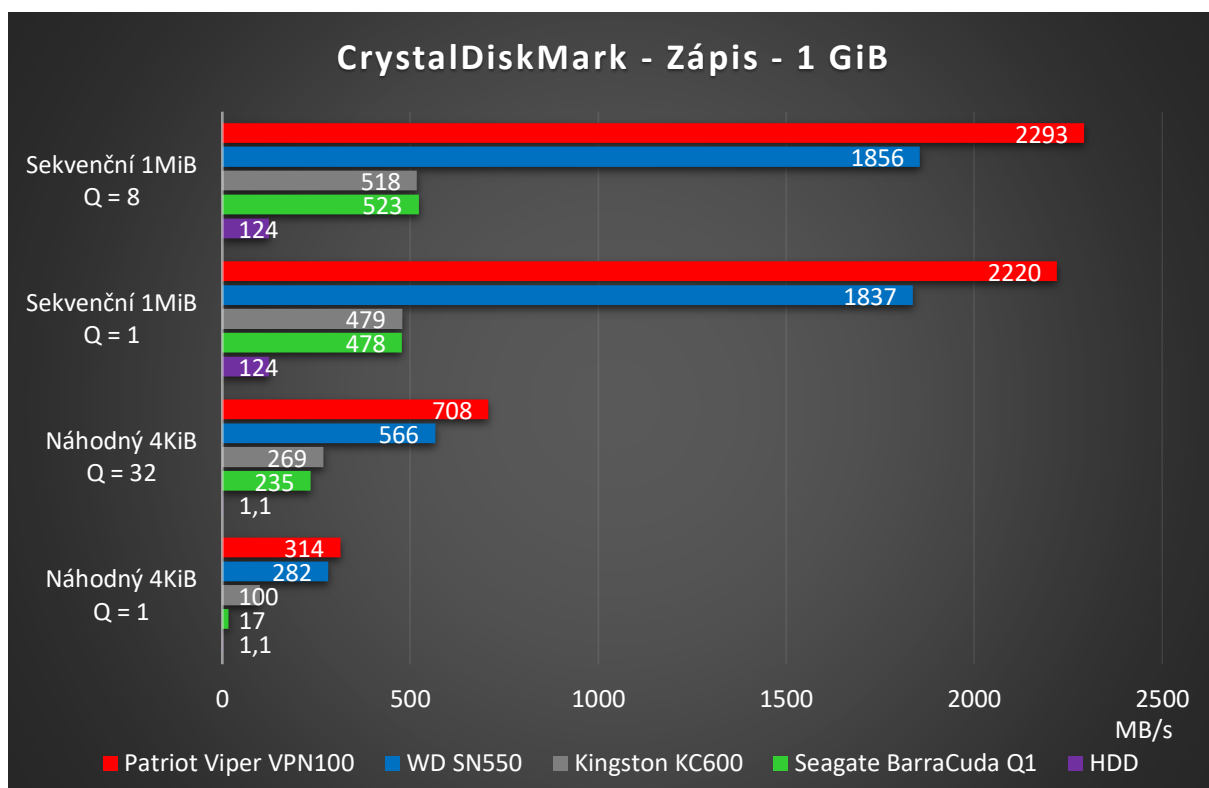
První měření proběhlo v programu CrystalDiskMark 8, což je nejspíše nejznámější a nejpoužívanější aplikace určená pro testování paměťových úložišť. Tento program má čtyři napevno stanovené oblasti čtení a zápisu, které jsou výstupem měření. Pro sekvenční čtení/zápis je to soubor o velikosti 1 MiB, s frontou dávkování souborů o velikosti 8 a jednotlivě. K testu náhodného čtení/zápisu slouží soubor o velikosti 4 KiB, stejně jako u sekvenčního při dávkování po jednom, ale také s frontou o velikosti 32, která je ovšem dalece vzdálená běžné uživatelské praxi. Výsledky prvního měření jsou zaneseny v grafu na obr. 32.



Obrázek 32: Měření rychlosti čtení v programu CrystalDiskMark s prostorem 1 GiB

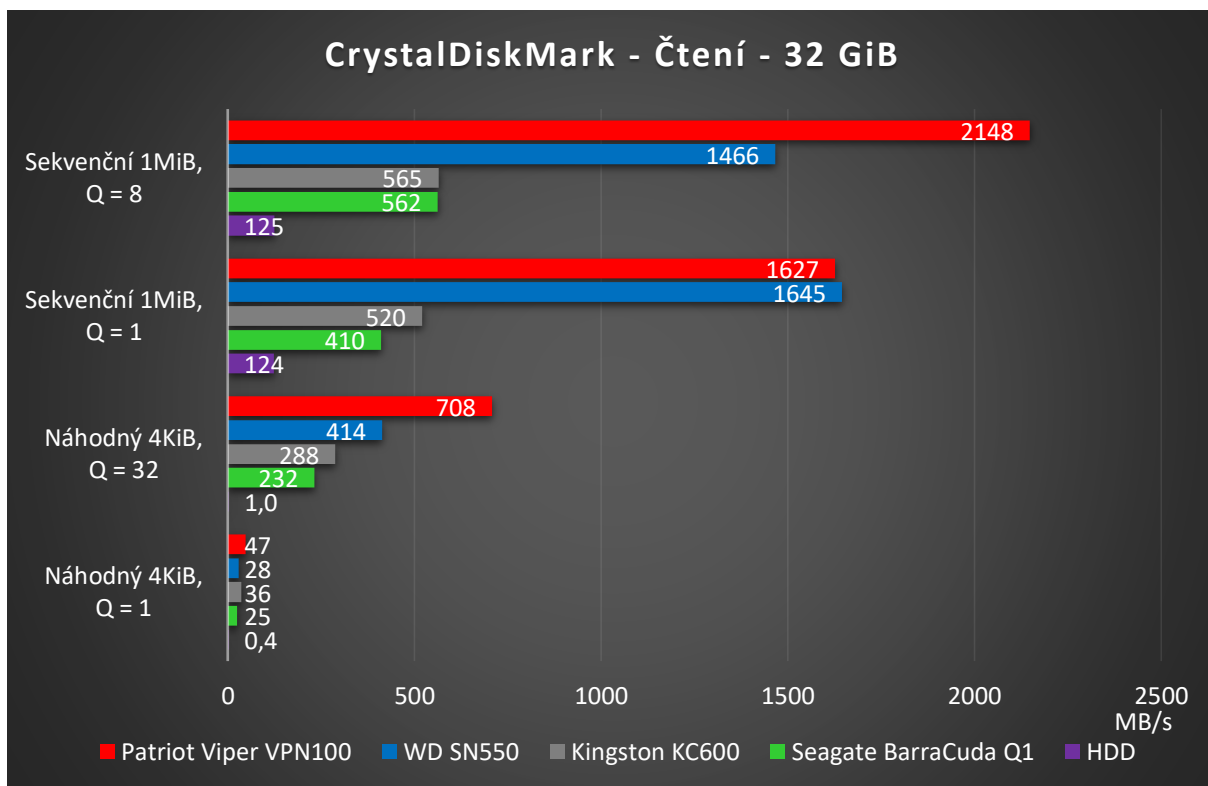
Z parametrů testu, které lze nastavit je nejprve měřeno s prostorem vyhrazeným pro test o velikosti 1 GB a poté o velikosti 32 GB. V obou případech bylo nastaveno pětinašobné opakování, ze kterého program zobrazí nejvyšší hodnoty. Jako výstup lze nastavit i počet IOPS, ale v tomto případě nás více zajímají rychlosti v megabajtech za sekundu.

Z výsledků měření je na první pohled patrný propastný rozdíl mezi SSD a HDD, nejen při sekvenčním, ale zejména náhodném přístupu k datům. Při sekvenčním čtení lze pozorovat největší rozdíl mezi technologiemi disků, tedy 4,5násobného zrychlení SSD disků oproti HDD, při využití totožné sběrnice a dokonce více než 20násobného zrychlení v případě disků využívající standard NVMe. Nejspíše nejvíce vypovídající je však měření s náhodným přístupem k souborům o velikosti čtyř KiB, zejména pak s frontou Q = 1, ke kterému dochází při běžné práci s počítačem nejčastěji. Zde se mohou kvalitní SATA SSD měřit i s NVMe konkurenty, klasický plotnový disk je v tomto ohledu průměrně téměř 100x pomalejší. Výsledek měření rychlosti zápisu lze vidět na obr. 33.



Obrázek 33: Měření rychlosti zápisu v programu CrystalDiskMark s prostorem 1 GiB

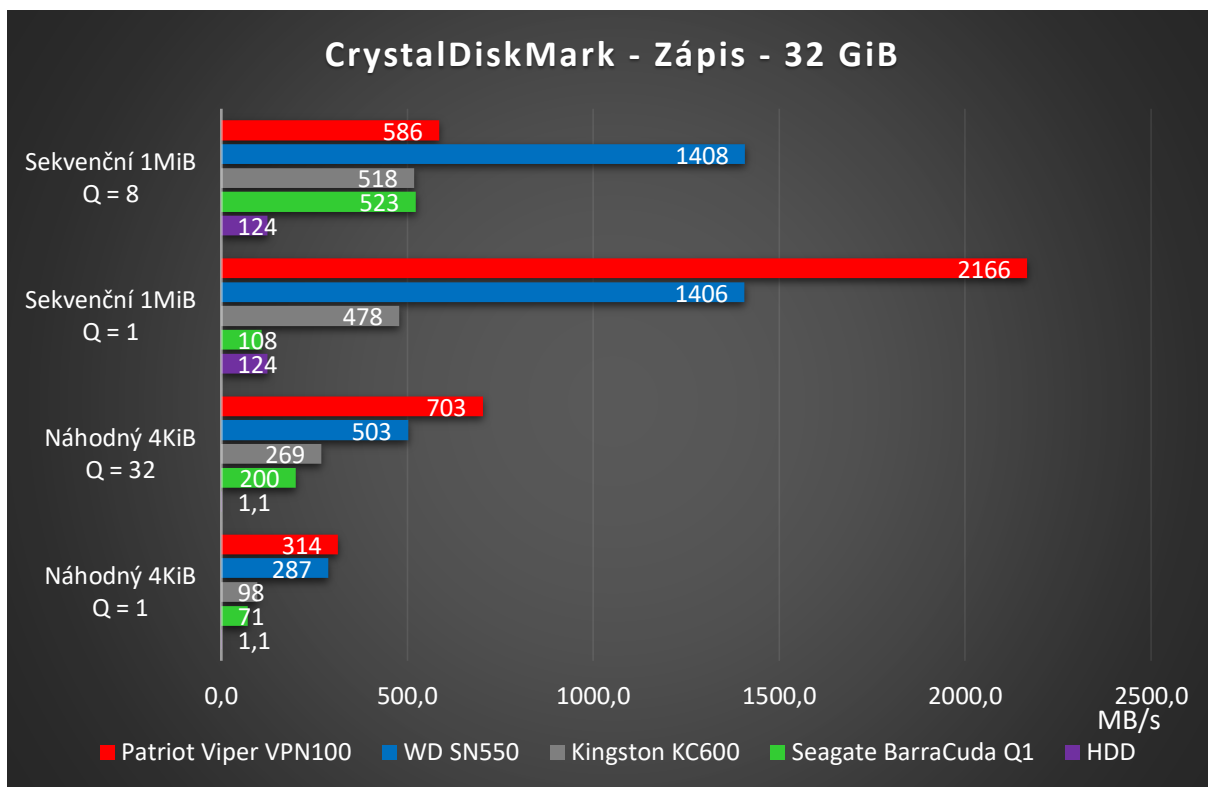
V případě zápisu malých souborů s jednotlivým dávkováním SATA SSD již rychlejšími protějšky nestíhají, výrazně zaostal zejména Seagate BarraCuda Q1. Nejdražší testovaný model Viper VPN100, tentokrát zvítězil ve všech čtyřech oblastech, v případě čtení se nejlépe jevil ekonomicky dostupnější model od Western Digital. Měření bylo následně opakováno, kvůli zjištění, jak si disky povedou, při obsáhnutí 32GiB prostoru, to lze vidět na obr. 34.



Obrázek 34: Měření rychlosti čtení v programu CrystalDiskMark s prostorem 32 GiB

Na tuto změnu jednotlivé disky reagují naprosto rozdílně. Sekvenční přístup nejvíce poznamenal NVMe SSD, zejména v případě větší fronty, kdy rychlost spadla zhruba o třetinu, stále si však drží velký rozestup na disky připojené přes sběrnici SATA. WD byl negativně ovlivněn ve všech oblastech měření, naopak Patriot se v některých zlepšil, Kingston zase podal nejkonstantnější výkon. Zjištěné hodnoty v rámci zápisu jsou k vidění na obr. 35.

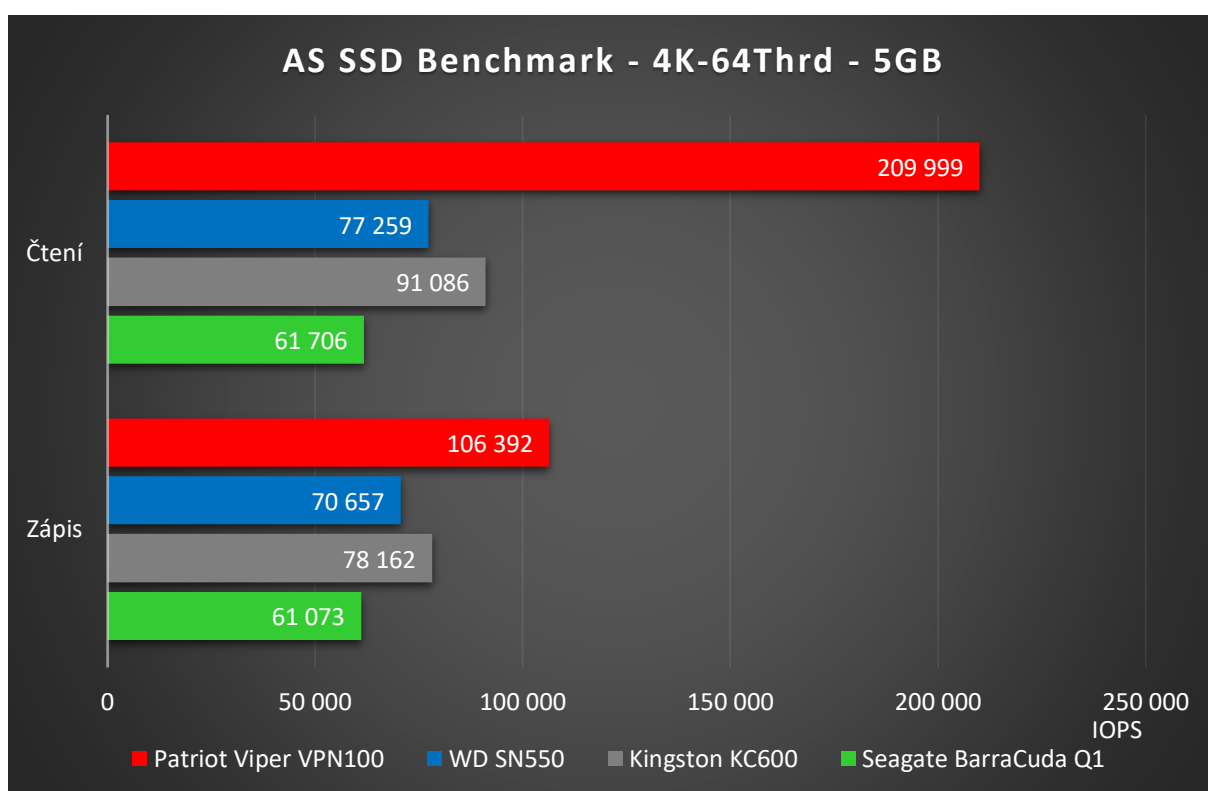




Obrázek 35: Měření rychlosti zápisu v programu CrystalDiskMark s prostorem 32 GiB

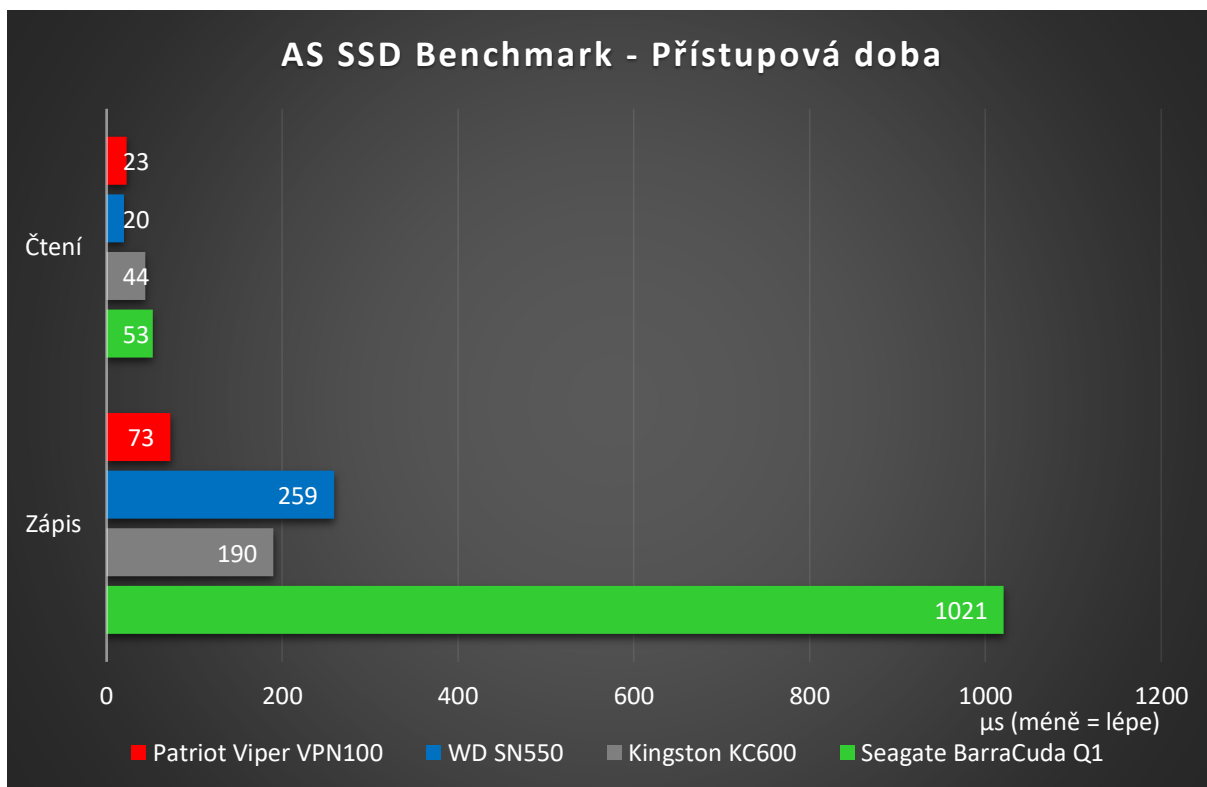
Při měření zápisu došlo k velmi zvláštnímu výsledku v případě modelu Viper VPN100, jehož výkon v sekvenčním zápise by měl být konstantní napříč celou jeho kapacitou. V případě velké fronty dávkování byl ale ovlivněn natolik, že jeho rychlost sekvenčního čtení klesla téměř na úroveň SATA modelů. Tento výsledek působí o to zvláštněji, když v ostatních třech oblastech měření podal téměř totožný výkon. Neobvykle si počínal také SSD disk od výrobce Seagate, u kterého klesla hodnota sekvenčního čtení velkých jednotlivě dávkovaných souborů dokonce pod úroveň plotnového disku. Po velmi špatném výsledku ve čtení s náhodným přístupem s jednoduchou frontou, v předešlém testu s vyhrazeným prostorem 1 GiB se v tomto ohledu naopak výrazně zlepšil.

Dalším programem, ve kterém bylo provedeno měření, se nazývá AS SSD Benchmark. Tato aplikace pro měření využívá nekomprimovatelných souborů a výsledné zobrazené hodnoty, jsou průměrem všech naměřených, nastavovat lze pouze velikost prostoru, který bude pro test vyčleněn. Měřit je opět možné sekvenční čtení a zápis, tentokrát souboru o velikosti 16 megabajtů. Výsledky v této oblasti jsou však velmi podobné těm naměřeným v programu CrystalDiskMark. Proto nás v tomto případě více zajímají výsledky měření čtyřkilobajtových souborů s frontou dávkování o velikosti 64. V praxi jde sice o nesmyslně velkou frontu dat, avšak je tímto způsobem možné nejlépe otestovat maximální hodnoty IOPS jednotlivých disků. Tyto výsledky jsou shrnuty na následujícím obrázku (obr. 36).



Obrázek 36: Měření počtu operací za sekundu v programu AS SSD Benchmark

Z výsledků je patrný velký rozdíl mezi modelem Viper a ostatními disky v případě čtení, kde SSD s druhým nejvyšším počtem operací za vteřinu byl překvapivě SATA disk, konkrétně ten od Kingstonu. Při zápisu u VPN100 dochází k velkému propadu IOPS, ale stále si drží náskok v podobě téměř třiceti tisíc operací za sekundu. Model Seagate Barracuda Q1 podal sice nejkonstantnější výkon v obou případech, byl ale také oproti ostatním diskům o něco pozadu. Dalším měřeným parametrem v programu AS SSD Benchmark byla přístupová doba, výsledky jsou uvedeny v grafu na obr. 37.

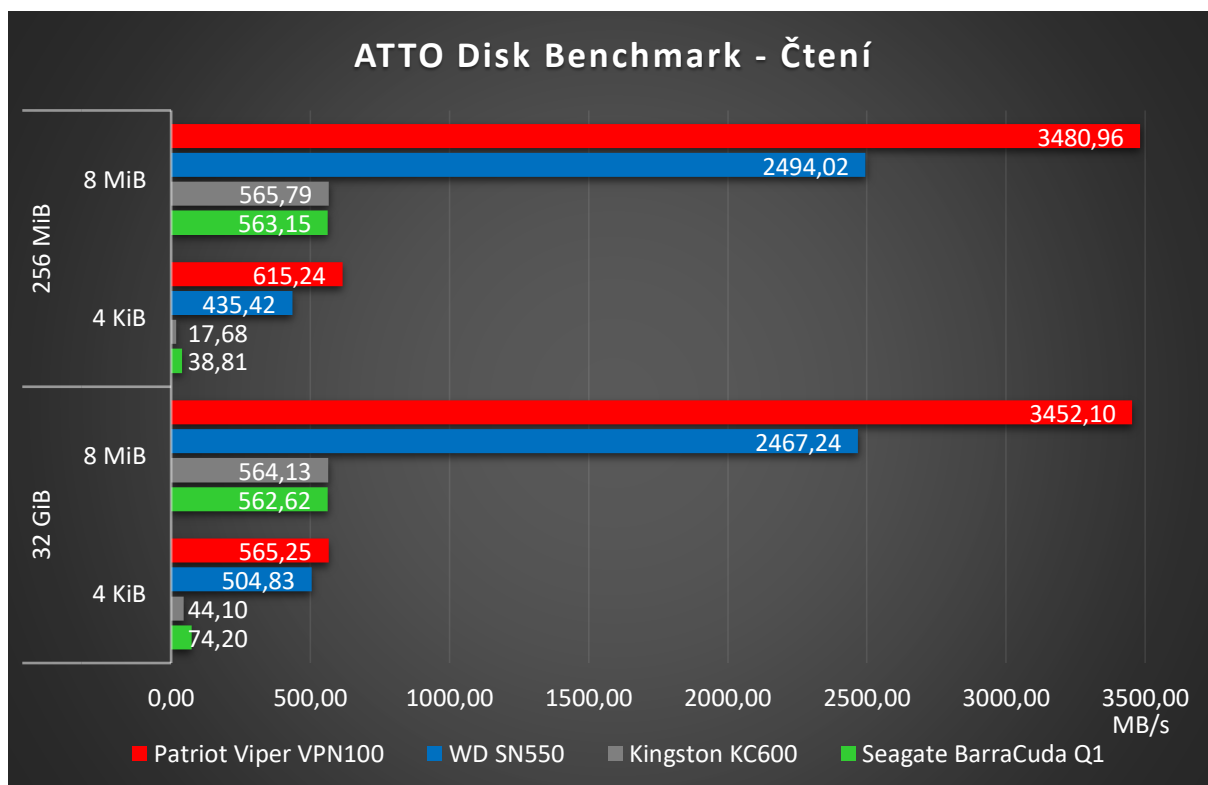


Obrázek 37: Měření přístupové doby v programu AS SSD Benchmark

Měření přístupové doby v programu AS SSD Benchmark jistým způsobem potvrdilo hodnoty z tab. 1, uvedené ve čtvrté kapitole této práce. NVMe SSD od značky WD dokonce v rámci čtení předčil dražšího konkurenta a atakoval spodní hranici uvedenou ve zmiňované tabulce. Z výsledků je dále patrné, že v případě čtení jsou oproti zápisu rozdíly mezi jednotlivými modely minimální. Nejkratší přístupovou dobu při zápisu zaznamenal model Viper, u SSD od Seagate se naopak projevila slabina QLC pamětí, kdy doba přístupu činila více než jednu milisekundu.

Další měření proběhla v programu ATTO Disk Benchmark. Tato aplikace sice není nijak výjimečná ve smyslu typu měření, avšak dokáže změřit a graficky zobrazit širokou škálu velikostí testovaných souborů. Při jednom spuštění testu lze změřit rychlost čtení a zápisu až jedenadvaceti různých velikostí souborů, od 512 bajtů do 64 megabajtů. Zde opět vyvstává zmiňovaný problém s násobky jednotky bajt. Přestože se v programu objevují jednotky KB, MB, nebo GB, v nápovědě utility se lze dočíst, že je počítáno s mocninami  $2^x$ , což tedy odpovídá méně známým KiB, MiB a GiB, kromě výstupu v podobě obrázku, ale tento program stejně jako ostatní umožňuje ukládání naměřených hodnot do textových souborů, kde jsou jednotlivé hodnoty uloženy v bajtech. V grafu na obr. 38, jsou tedy vstupní hodnoty uvedeny v KiB a MiB, přestože v programu jsou uvedeny jako KB a MB. Výsledné hodnoty měření jsou naopak hodnoty v bajtech podělené hodnotou  $10^6$ . V úvahu je třeba brát fakt, že tento program

zkoumá pouze sekvenční přístup k datům. Změřené přenosové rychlosti u malých souborů tedy není vhodné porovnávat např. s těmi, změřenými programem CrystalDiskMark, kde je k 4 KiB souborům přistupováno náhodně. ATTO Disk Benchmark tedy není vhodným nástrojem pro testování disků z pohledu rychlosti odezvy operačního systému. Při frontě dat, nastavené na úroveň 4 je zde až na výjimky vidět znatelný rozdíl oproti náhodnému přístupu s  $Q = 1$ , změřeném v CrystalDiskMark. Testování proběhlo při dvou velikostech vymezeného prostoru a to při v základu nastavených 256 MiB a maximálních 32 GiB.

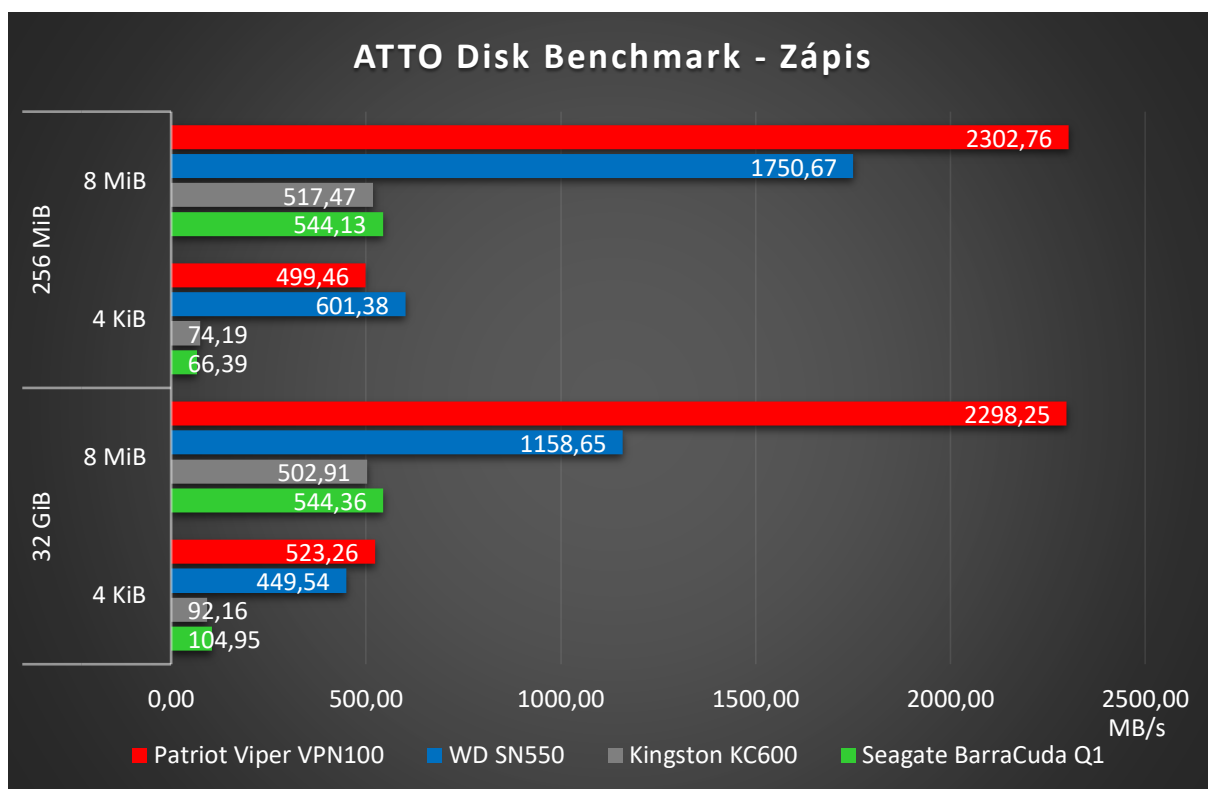


Obrázek 38: Měření rychlosti sekvenčního čtení v programu ATTO Disk Benchmark

Z celé škály velikostí souborů byly vybrány dvě hodnoty, opět jde o typickou velikost, s 4 KiB, ta zde však nereprezentuje data operačního systému, ale vzhledem k tomu, že jde o sekvenční přístup, lze si tento test v praxi představit např. jako přesouvání velkého množství textových souborů. Druhou měřenou velikostí je 8 MiB, která může odpovídat například obrázku s vysokým rozlišením, či zvukovému souboru ve formátu MP3.

Vcelku nepřekvapivě model Viper dominoval ve všech oblastech tohoto testu s konstantním rozestupem na WD, zde lze říci, že výsledky odpovídají jejich cenovému zařazení. Obě 2,5" SSD byly u větších souborů opět schopny lehce překonat hranici 560 MB/s, kde nejspíše leží jejich teoretické maximum. V rámci čtení malých souborů, je při sekvenčním přístupu mnohem znatelnější odstup NVMe disků, od těch používající rozhraní SATA.

Tento typ testu nesvědčil zejména modelu od výrobce Kingston, kdy při malém vyhrazeném prostoru vykazoval nižší rychlost, než v případě náhodného přístupu. Na obr. 39 je možné vidět, jak si jednotlivé SSD disky vedly v tomto měření při zápisu.

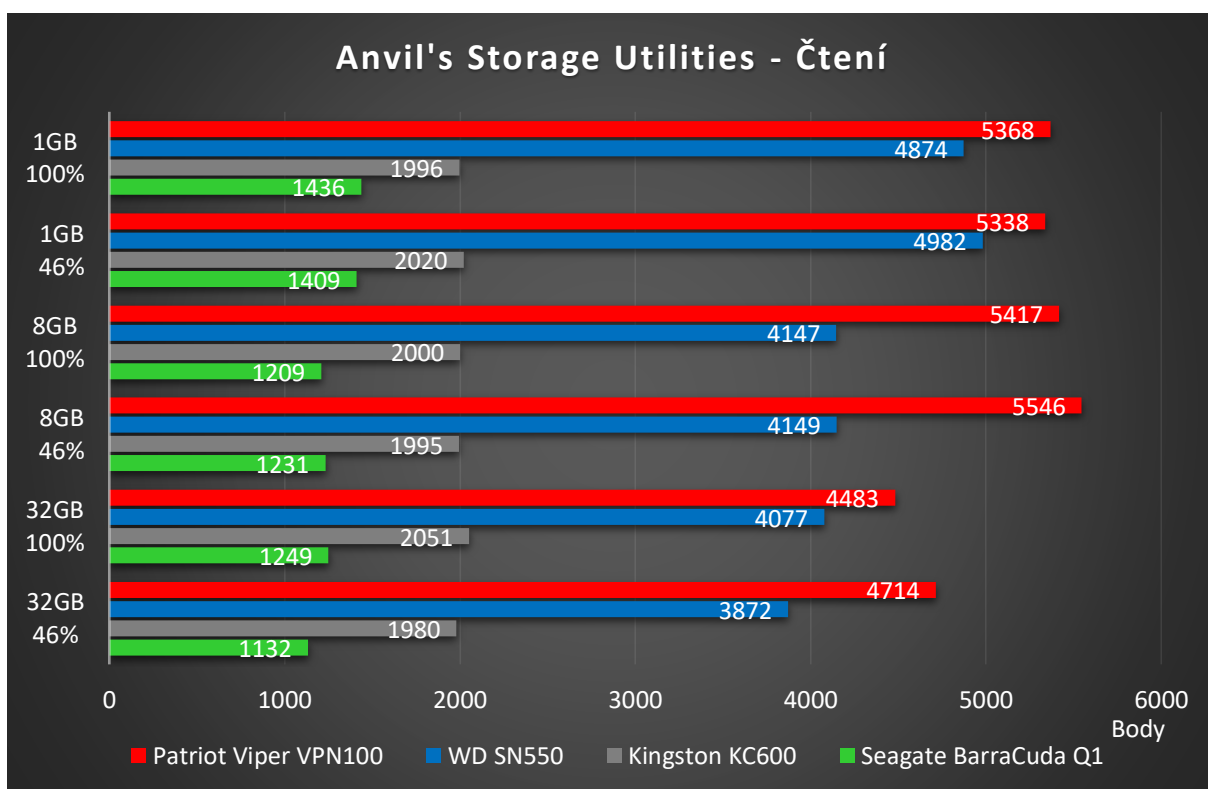


Obrázek 39: Měření rychlosti sekvenčního zápisu v programu ATTO Disk Benchmark

Výsledky testu zápisu až na výjimky odráží ty předešlé, jen s nižšími hodnotami. Na první pohled si zle ale všimnout propadu rychlosti u modelu SN550, při zápisu 8MiB souboru v 32 GiB prostoru. V případě zápisu malých souborů v menším prostoru byl naopak nejlepší. KC600 při sekvenčním zápisu 4KiB souborů podal opět horší výkon, než v případě zápisu náhodným, změřeném v programu CrystalDiskMark.

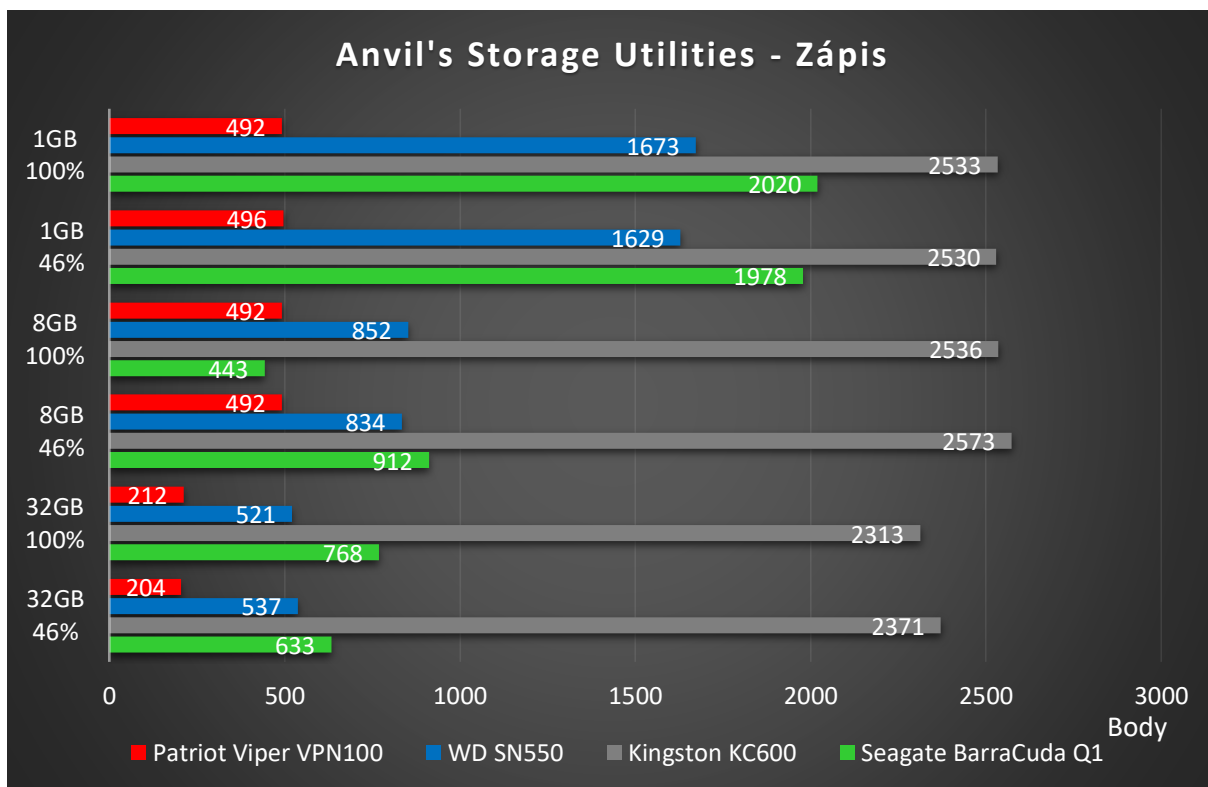
Předposledním a zároveň nejspíše tím nejdůležitějším programem, využitým při psaní této práce je Anvil's Storage Utilities. Kromě klasického měření přenosových rychlostí disků, nabízí totiž i funkci SSD Endurance, která byla spuštěna po každý den v době testování, za účelem zatěžování SSD disků neustálým zápisem náhodných dat. Pro testování přenosových rychlostí byl ale vybrán i díky ojedinělé možnosti nastavení úrovně komprese dat. Jak již bylo napsáno dříve, měřicí programy k testu nejčastěji využívají stoprocentně nekomprimovatelná data. V tomto případě tak bude možné porovnat, jak vybrané disky dokáží pracovat se soubory, které jsou komprimovány ze 46 %, což mohou být data reprezentující soubory běžně využívaných počítačových programů.

Anvil's Storage Utilities zároveň také dokáže změřit nejvíce různých parametrů, pro různě velké soubory najednou. Parametry při čtení a zápisu lze měřit samostatně, ale i v rámci jednotného testu. V případě čtení je to soubor o velikosti 4 megabajtů, sekvenčním přístupem a 4, 32 a 128 kilobajtů s přístupem náhodným, přičemž čtyřkilobajtový soubor je měřen nejen s jednotným dávkováním, ale také s frontou dat o velikosti 4 a 16. Měření zápisu je podobné, vyjma souborů o velikosti 32 a 128 KB, které jsou vynechány. Pro všechny zmíněné je jednotlivě kromě rychlosti v megabajtech za sekundu, i měřen počet operací za sekundu a přístupová doba. Nastavit lze také velikost vymezeného prostoru pro test, přičemž měřeno bylo nejprve s jedním a poté se 32 gigabajty. Program na základě všech změřených hodnot vypočítá skóre zvláště pro čtení a zápis, první z těchto hodnot jsou uvedeny v grafu na obr. 40.



Obrázek 40: Komplexní měření všech parametrů při čtení v programu Anvil's Storage Utilities

Nejkonzistentnější výkon v tomto testu podal Kingston. Stejný trend, avšak pochopitelně s odlišnými hodnotami vykazovali SSD od Seagate a WD, které nejprve ovlivnila změna velikosti vymezeného prostoru pro test a poté i odlišná úroveň komprimace dat. Model Viper VPN100 si nejlépe počínal ve středně velkém prostoru s aplikačními soubory, výkonnostní propad tak u něj nastal až při nastavení vymezeného prostoru o velikosti 32 GB, přičemž si opět lépe vedl se soubory s nižší komprimací. Naměřená skóre při zápisu jsou uvedena na obr. 41.



Obrázek 41: Komplexní měření všech parametrů při zápisu v programu Anvil's Storage Utilities

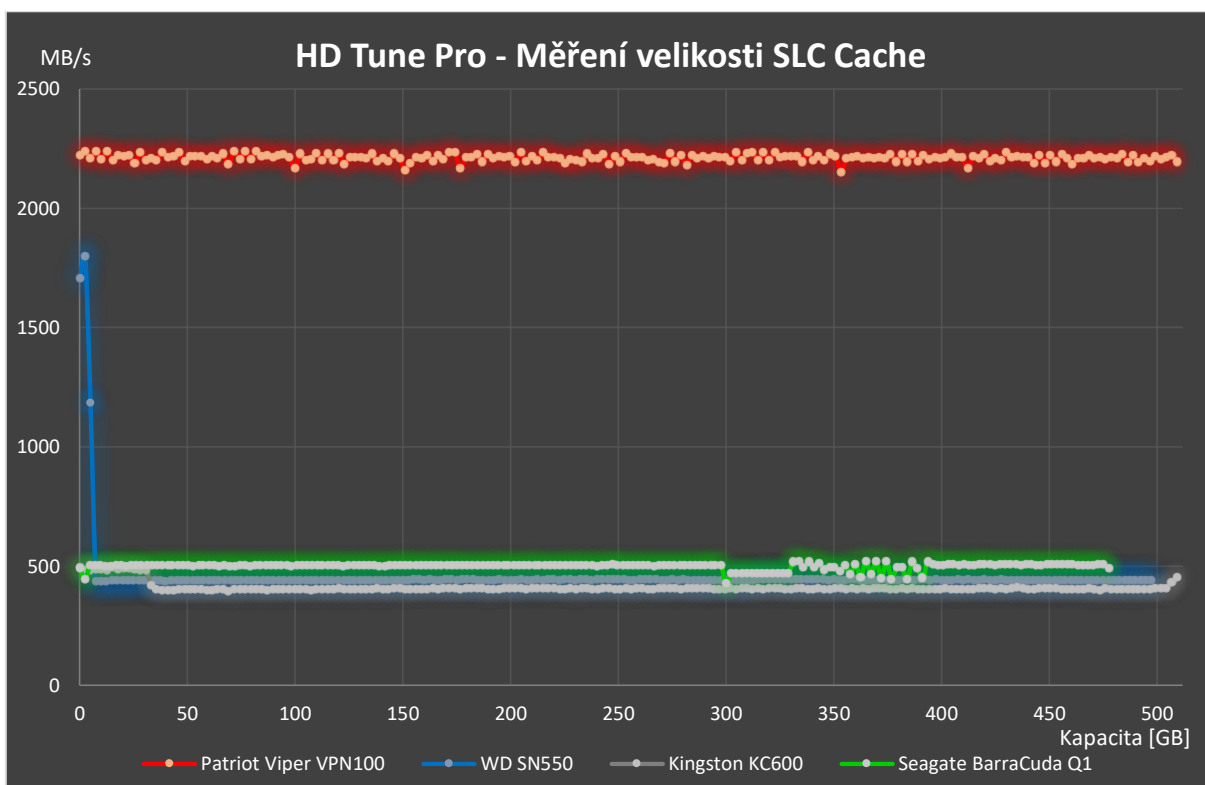
Velice nečekané výsledky přinesl test rychlosti zápisu, kde nepodobně jakémukoliv z předchozích testů, podal nejdražší z vybraných modelů SSD disků Viper VPN100, suverénně nejhorší výkon. Naopak nejlépe z tohoto testu vyšel Kingston K600, který nejenže udržel nejstabilnější výkonnost ve všech oblastech testu, ale také v každém z nich obdržel nejvíce bodů. Lze si povšimnout, že tento druh testu nebyl nakloněný SSD diskům využívající standard NVMe, jelikož i když modely od Seagate a WD vykazovali opět podobný trend, byl to tentokrát prvně jmenovaný, jež v pěti případech svého dražšího konkurenta předčil.

Posledním programem, který byl využit pro měření syntetických testů se nazývá HD Tune Pro. Jedná se o velice univerzální nástroj pro správu a měření parametrů paměťových úložišť. Kromě běžných testů přenosových rychlostí, IOPS a přístupové doby nabízí funkcionality jako je důkladné vymazání disků, nebo kontrolu paměťových bloků.

V této práci byl ale stejně jako předchozí program využit díky funkci, kterou jiný z programů nenabízí. Jde o možnost měření rychlosti zápisu dat v celém rozsahu kapacity disku a jeho vyobrazení do grafu. Tímto způsobem lze spolehlivě zjistit velikost SLC Cache paměti, kterou výrobci SSD disků do svých modelů implementují ve formě DRAM, či SRAM za účelem dosažení vyšších výkonů. Dnes je stále běžnější narazit na SSD, kterému SLC Cache dokáže zajistit konstantní rychlost zápisu, což je případ, kdy je velikost SLC Cache rovna

celkové kapacitě SSD disku. Většinou v případě, kdy něco takového nabízený model nesplňuje, výrobce hodnotu této paměti neudává a spotřebitel je tak odkázán na recenze odborných webů a časopisů. Jedná se přitom o velmi důležitý parametr, kdy v nejhorším, ne však neobvyklém případě může rychlost zápisu po využití několika desítek gigabajtů kapacity, klesnout třeba až na polovinu výrobcem udávané hodnoty.

Jelikož při tomto testu dochází k zápisu dat v rámci celé kapacity disku, není jej možné provést, pokud jsou na SSD uložena jakákoliv data. Ani po jejich záloze a odstranění, program HD Tune Pro uživateli nepovolí test z důvodu přepsání všech paměťových buněk a tím jejich byť relativně miniaturnímu opotřebení (v případě jednoho přepsání) spustit. Trvá-li uživatel na provedení testu, je nejdříve nutné odstranit všechny oddíly na měřeném disku. Výsledek měření je zachycen na obr. 42.



Obrázek 42: Měření rychlosti zápisu v celém rozsahu kapacity disků v programu HD Tune Pro

Na tomto grafu je na první pohled patrná největší přednost modelu Viper, oproti SSD od výrobce Western Digital, tedy konstantní rychlost zápisu v celém rozsahu kapacity zařízení. Toho je dosaženo právě pomocí SLC Cache, jejíž kapacita se v případě Patriotu rovná celkové kapacitě zařízení, tedy 512 GB. Oproti tomu WD disponuje zhruba pouhými třemi gigabajty paměti SRAM, jež tuto funkci zastává.



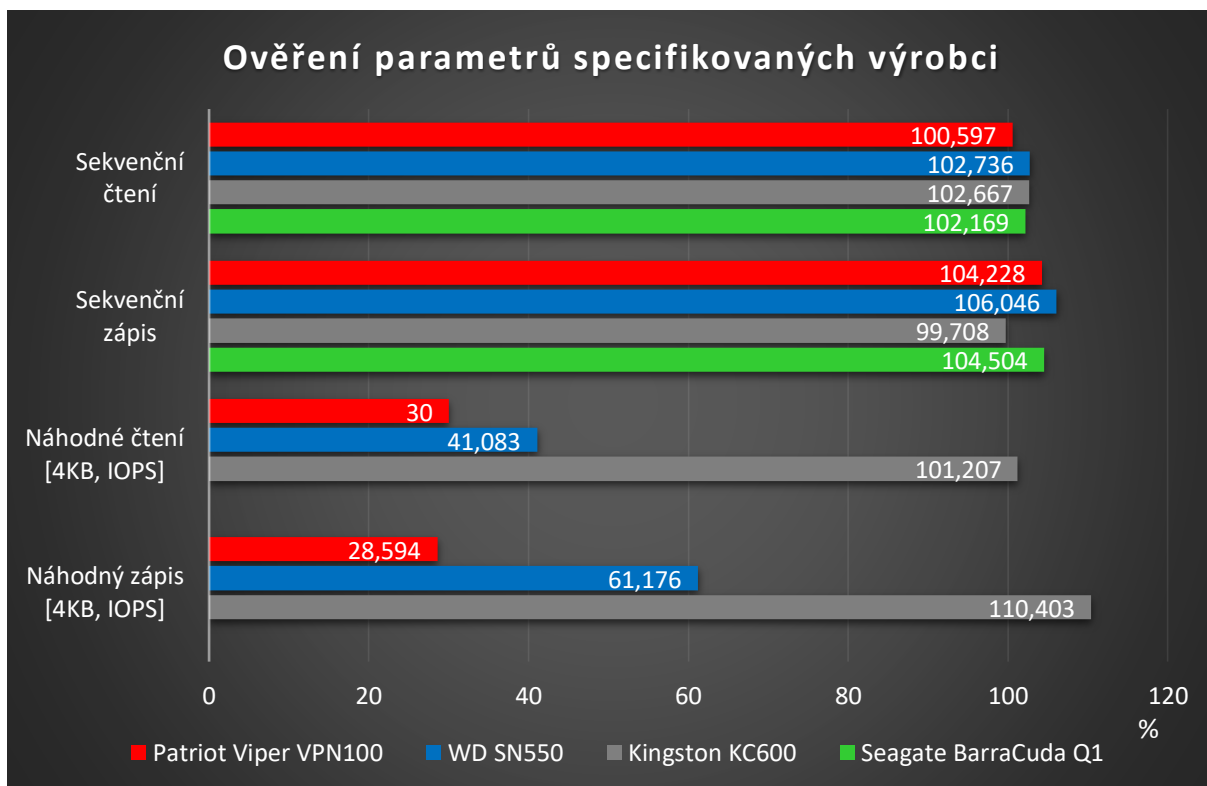
Pokud SSD disk neoplývá dostatečně velkou SLC Cache, je také otázkou, o kolik rychlost zápisu po jejím přečerpání klesne. Z grafu na obr. 42 je patrné, že v případě WD SN550 dochází k poklesu až na úroveň SSD disků využívající rozhraní SATA. Všechny důležité hodnoty jsou shrnuty v tab. 9.

Model Parametr	Seagate BarraCuda Q1	Kingston KC600	WD SN550	Patriot Viper VPN100
Max. rychlost zápisu [MB/s]	509	484	1755	2187
Min. rychlost zápisu [MB/s]	419	386	428	2102
Průměrná rychlost zápisu [MB/s]	488	401	449	2160
Odhad velikosti SLC Cache [GB]	480	31	3	512
Výkonnostní propad po přečerpání SLC Cache [%]	-	16,9	75,5	-

*Tabulka 9: Shrnutí měření rychlosti zápisu a velikosti SLC Cache*

Z naměřených dat lze odhadnout také kapacitu SLC Cache u modelu KC600, která má hodnotu okolo 30 GB, po jejímž zaplnění dochází k poklesu v rychlosti zápisu na hodnotu zhruba 400 MB/s. Seagate si po většinu své kapacity drží konstantní rychlost zápisu, přičemž v oblasti mezi třemi sty a čtyřmi sty gigabajty úrovně zaplnění, dochází k nepatrným výkyvům.

Dalším aspektem porovnání jednotlivých disků je nyní po několika různých syntetických testech ověření důvěryhodnosti, hodnot parametrů, které výrobci uvádějí. V následujícím grafu na obr. 43, je tedy zobrazeno srovnání, do jaké míry se tyto uváděné parametry shodují s naměřenými výsledky, použitými v této diplomové práci. Ze všech testů byly pro daný model vybrány vždy nejvyšší naměřené hodnoty každého parametru.



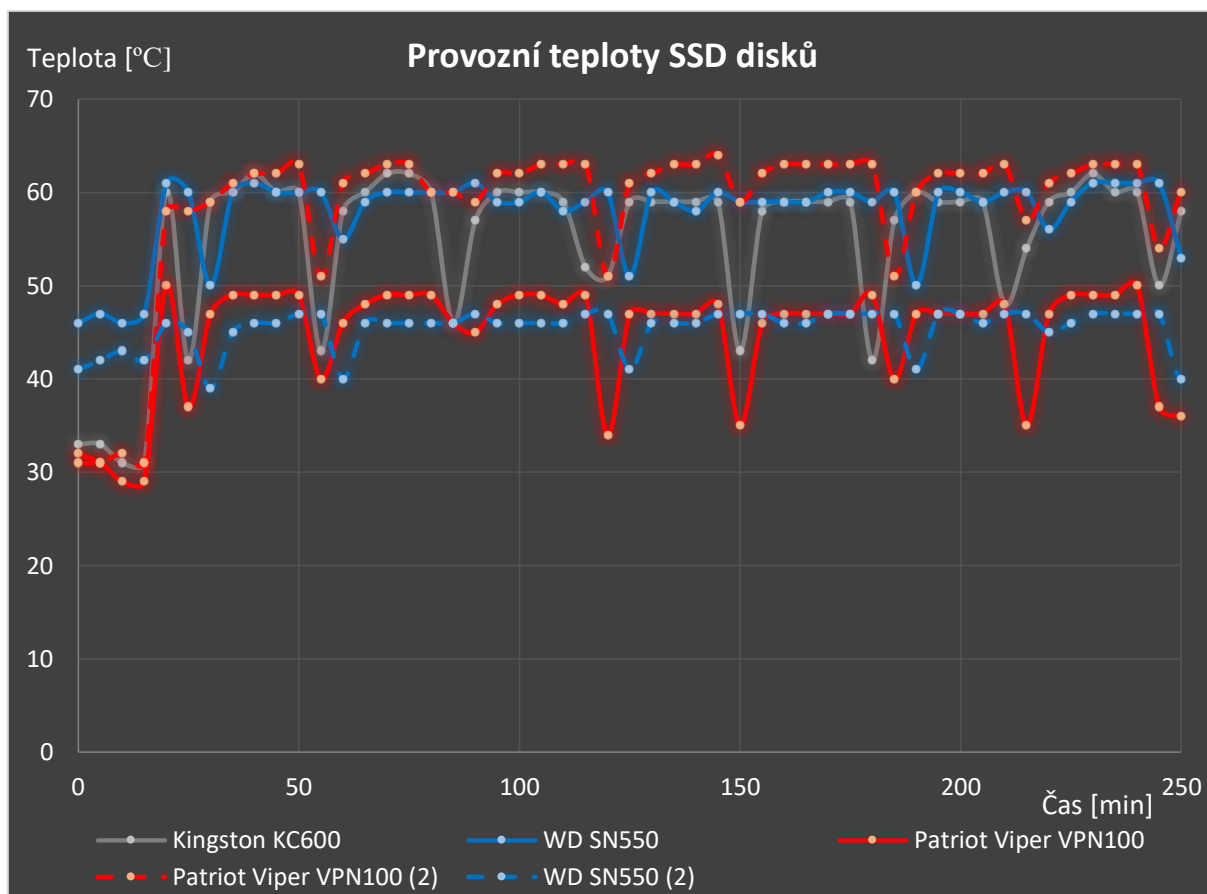
Obrázek 43: Porovnání nejvyšších naměřených hodnot s hodnotami udávanými výrobcí

Pozitivním poznatkem z tohoto grafu jistě je vesměs stoprocentní dodržení, výrobci slibovaných hodnot rychlosti sekvenčního čtení a zápisu. Pouze v případě Kingstonu nedošlo v jednom případě k překonání hranice 100 %, avšak pouze o zanedbatelnou část, která by mohla po opakovaném měření zaniknout.

Tento model ale naopak jako jediný dostal inzerovaným hodnotám počtu IOPS, při čtení a zápisu malých souborů. Zde se bohužel projevil onen marketingový nešvar, kdy vysoké číslo parametru IOPS, v tabulce katalogu působí na spotřebitele lákavěji, než pouhý zlomek hodnoty megabajtů za sekundu oproti sekvenčním rychlostem. Tyto výsledky zejména NVMe disků jsou o to větším zklamáním, uvážíme-li že těch nejvyšších hodnot bylo dosaženo díky až nesmyslně velké frontě dat, která při běžné práci s počítačem prakticky nemůže nastat.

## 6.4.2. Uživatelské testy

Při zatěžování SSD disků neustálým zápisem nahodilých dat pomocí funkce SSD Endurance, v programu Anvil's Storage Utilities, byla pomocí aplikace Hard Disk Sentinel konstantně měřena teplota všech čtyřech zařízení. Bohužel model BarraCuda Q1 měření teploty pomocí funkce S.M.A.R.T. nepodporuje, a proto v následujícím grafu (obr. 44) chybí.



Obrázek 44: Porovnání provozních teplot jednotlivých SSD disků

První čtyři hodnoty teplot každého z disků jsou změřené při klidovém režimu, tedy v době kdy není prováděno čtení ani zápis dat. Pátou hodnotou počínaje bylo spuštěno zmiňované zatěžování a z grafu je vidno, že na to disky ihned reagují nárůstem teplot. Tato hodnota se následně na čas ustálí a těsně před úplným zaplněním disku se zpravidla ještě o stupeň zvýší. Poté, když je disk zcela zaplněn, program zahájí proces mazání všech vytvořených dat, což způsobí náhlé ochlazení disku, po kterém ihned následuje opětovný zápis dat a s ním spojený nárůst teploty.

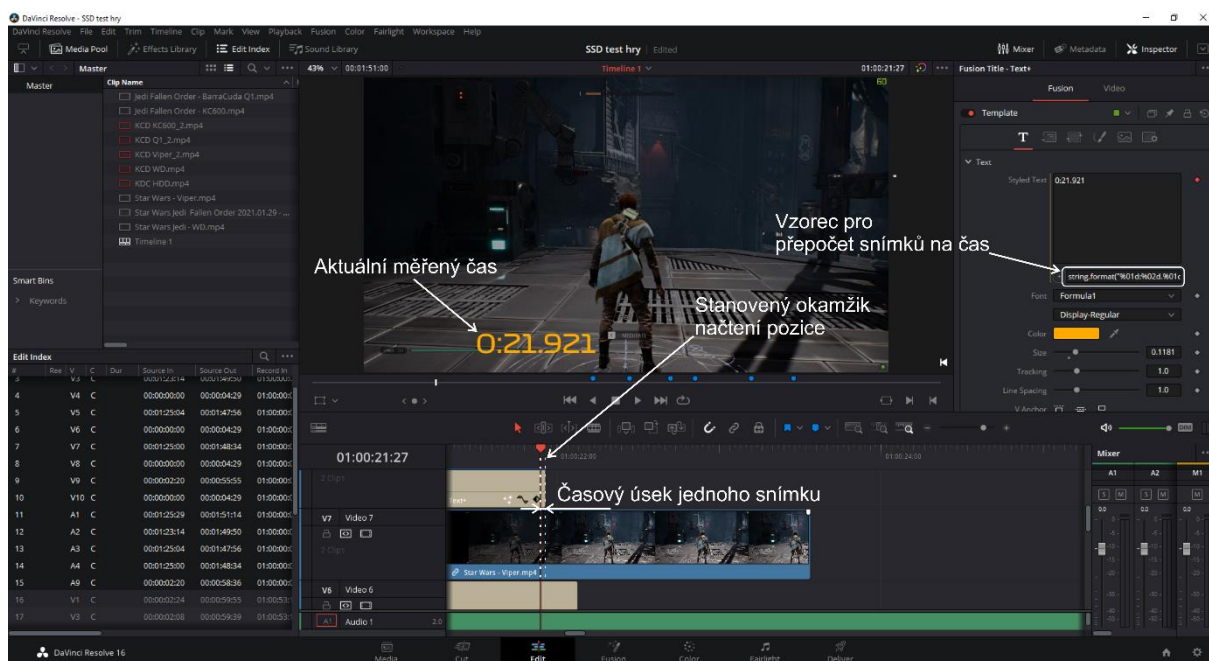
Z tohoto grafu také vyplývá, že měření teplot jednotlivých počítačových komponent je vysoce závislé na směru a teplotě proudění vzduchu, uvnitř počítačové skříně a tím pádem i na rozmístění měřených zařízení. V tomto případě se to týká dvou NVMe SSD disků, které při prvním měření byly na základní desku počítače připojeny, tak jak je uvedeno na obr. 30. V grafu se jedná o modré a červené plné křivky. Pozice těchto dvou disků byly následně prohozeny a tomu odpovídají v grafu čáry přerušované.

Z těchto výsledků je patrné, že pozice pod grafickou kartou je z hlediska provozních teplot znatelně méně výhodná a na teplotu pod ní umístěného zařízení nemělo vliv, zda přitom byla v zátěži, či nikoliv. Při porovnání těchto dvou SSD si v průměru o 0,5 °C nižší teploty udržel Viper, ale naopak na méně výhodné pozici, si v průměru o 0,8 °C lépe vedl disk od společnosti WD. Provozní teploty modelu KC600 se pohybovaly mezi vyššími hodnotami oběma zmíněných, s větším poklesem, jelikož smazání zapsaných dat u něj trvalo o něco déle.

K měření vlivu provozních teplot na výkonnost SSD disků byl znovu použit program HD Tune Pro, který umožňuje ihned opakovat měření rychlosti zápisu a tím tak zjistit rozdíl ve výkonnosti jednotlivých disků při různých provozních teplotách. Tento test neovlivnil pouze model SN550, který při druhém a třetím návazném měření zachoval totožnou křivku. U Obou SATA SSD, při zvýšené provozní teplotě začala rychlost zápisu kolísat mezi dvěma body, přičemž u modelu od Seagate došlo mírnému poklesu a Kingston si naopak v průměru oproti prvnímu měření polepšil. Vyšší provozní teplotou byl nejvíce ovlivněn model Viper VPN100, který si sice udržel konstantní rychlost zápisu, ta ale při třetím průchodu testem klesla v průměru o 30%, což se může zdát jako velký výkonnostní propad, stále šlo však o téměř tisíc megabajtů za sekundu rychlejší zápis, než v případě druhého nejlepšího modelu v tomto ohledu.

Nejspíše nejpočetnější skupinou uživatelů, kteří si pečlivě vybírají jednotlivé počítačové komponenty, jsou hráči počítačových her. Pro ně sice SSD disk nenabídne ve hrách zvýšení výkonu, v podobě vyšších hodnot zobrazených snímků za vteřinu, ale stejně jako všem ostatním uživatelům ušetří cenný čas, v tomto případě při načítání uložených pozic ve hře. V některých případech SSD také dokáže odstranit krátká zaseknutí, která nastávají při přechodech mezi paměťově náročnými lokacemi ve hře, ke kterým dochází, pokud je hra nainstalována na klasickém pevném disku.

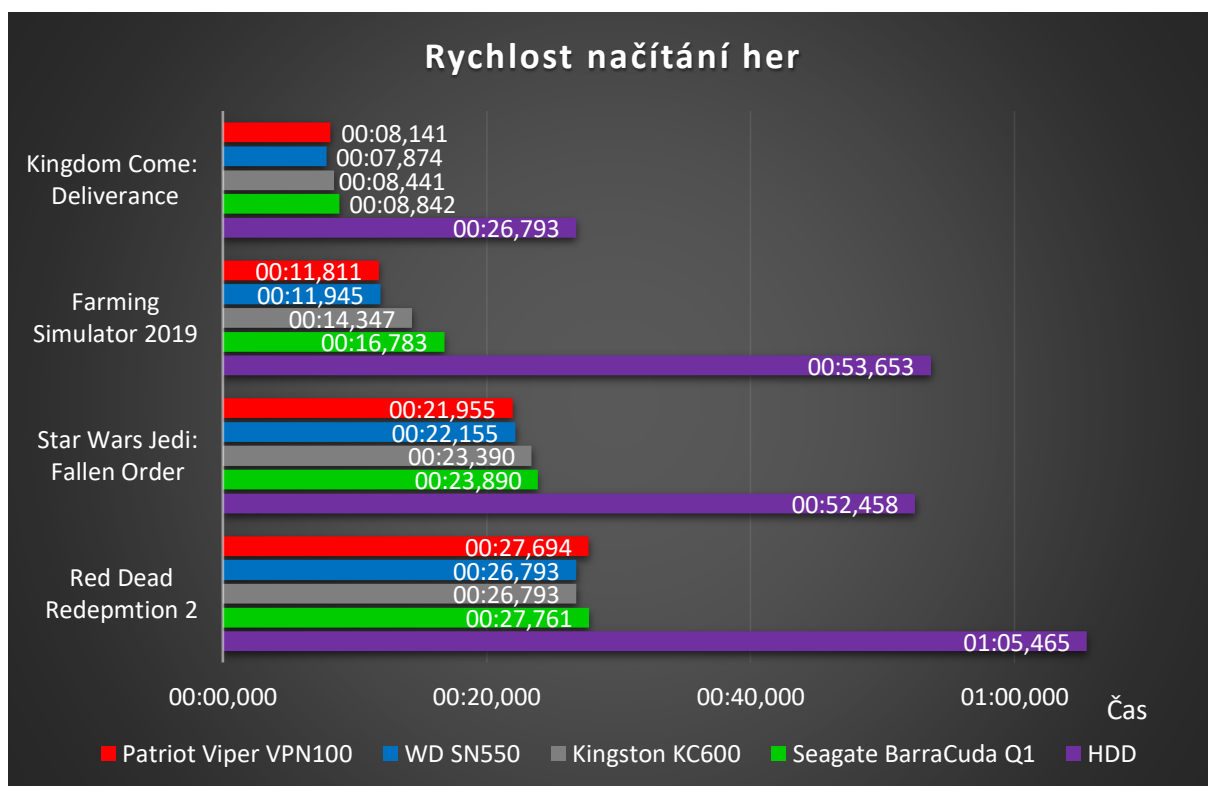
Předmětem tohoto měření byla tedy doba, za kterou se načte vybraná uložená pozice ve hře, která samozřejmě z důvodu přesnosti měření, byla pro všechny disky stejná. Jelikož pro takováto měření neexistuje žádná speciální aplikace a pouhé měření času pomocí stopek by nebylo dostatečně přesné, bylo zapotřebí vymyslet vlastní metodiku, která je naznačena na obr. 45 a dále popsána v následujícím odstavci.



Obrázek 45: Metodika měření času načítání her

Každá z her byla nainstalována na jednotlivá zařízení a vždy před načtením vybrané uložené pozice, bylo spuštěno nahrávání obrazovky pomocí funkce NVIDIA Share, aplikace GeForce Experience. Všechna nahraná videa byla poté nainportována do editovacího programu DaVinci Resolve.

S přesností na jeden snímek byl stanoven referenční začátek a konec měřeného úseku a pomocí vloženého vzorce, který přepočítává časový úsek snímků na milisekundy, byly vytvořeny virtuální stopky. Jelikož bylo video pořízeno rychlostí 30 snímků za vteřinu, přesnost měření tedy odpovídá, časovému rozdílu mezi dvěma snímky, což je přibližně třetina z desetiny vteřiny. V následujícím grafu na obr. 46, jsou zaneseny výsledné hodnoty takto naměřených časů.

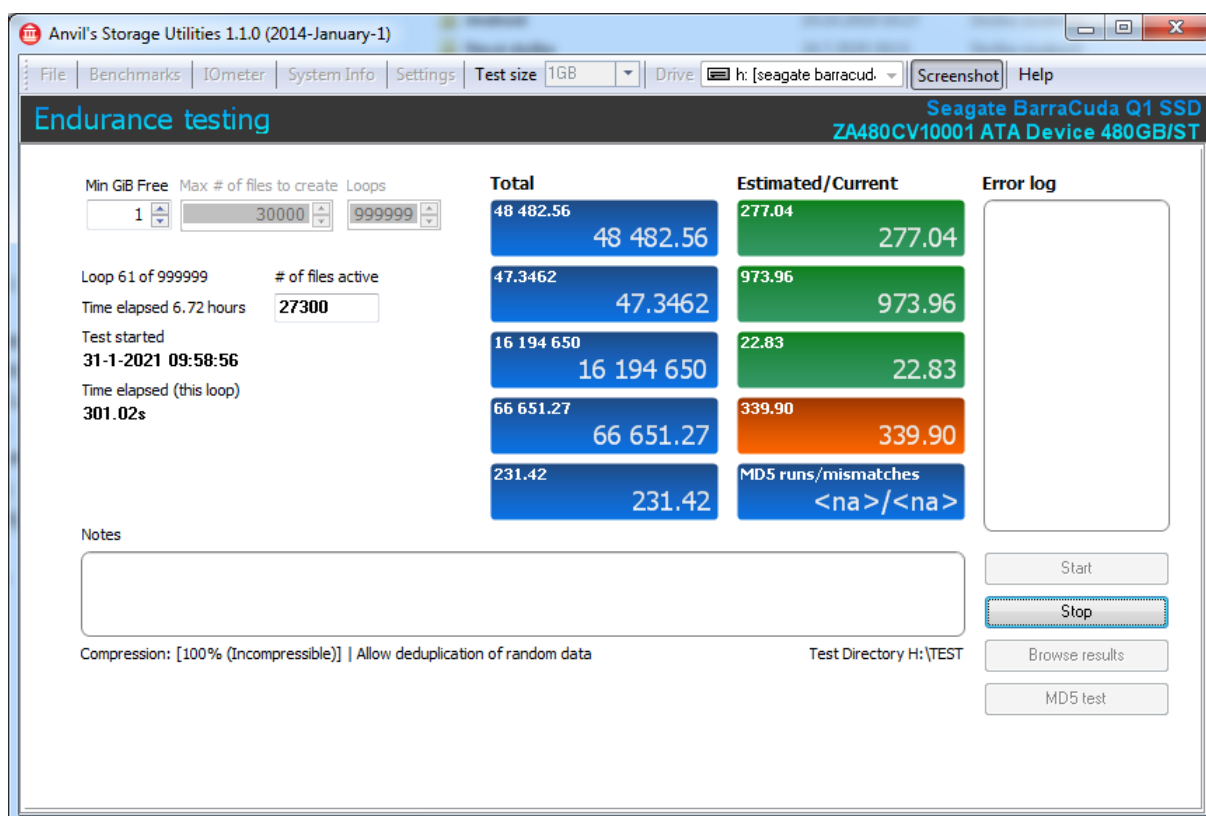


Obrázek 46: Porovnání rychlosti načítání her mezi SSD a HDD

Ze zjištěných údajů je na první pohled zřejmé, že načítání uložených pozic z pevného disku, trvá při nejmenším dvakrát tak déle oproti situaci, kdy jsou hry nainstalované na SSD. Doba spouštění hry a její načtení do menu měřena sice nebyla, ale pocitově bylo opět znatelné, z jakého typu úložiště je spuštěna. Rozdíly mezi jednotlivými SSD jsou minimální, a proto lze uživatelům, kteří chtějí využívat toto zařízení pouze k tomuto účelu, doporučit i ty nejlevnější modely využívající rozhraní SATA.

### 6.4.3. Dlouhodobé zatěžování

Posledním bodem praktické části této diplomové práce, byl i jejím hlavním zájmem, tedy prověření životnosti a spolehlivosti vybraných SSD disků. K tomu bylo zapotřebí subjekty vystavit dlouhodobému nadměrnému zatížení, v podobě denního zápisu několika terabajtů dat. K tomuto účelu velmi dobře posloužil již dříve zmiňovaný program Anvil's Storage Utilities, tentokrát se svou ojedinělou funkcí, příznačně nazvanou SSD Endurance. Na obr. 47 je zobrazeno a v následujících odstavcích popsáno uživatelské prostředí se všemi nastavovanými, měřenými a zobrazovanými parametry.



Obrázek 47: Náhled uživatelského prostředí funkce SSD Endurance, programu Anvil's Storage Utilities

V levé horní části je oblast pro nastavování parametrů, kde v prvním poli lze zvolit na kolik gibibajtech zbývajících volného místa, program zastaví svůj zapisovací cyklus a začne vytvořené soubory mazat. Výchozí nastavení, které činí 12 GiB, bylo před každým spuštěním změněno na hodnotu 1 GiB, aby došlo vždy téměř ke kompletnímu zaplnění disku.

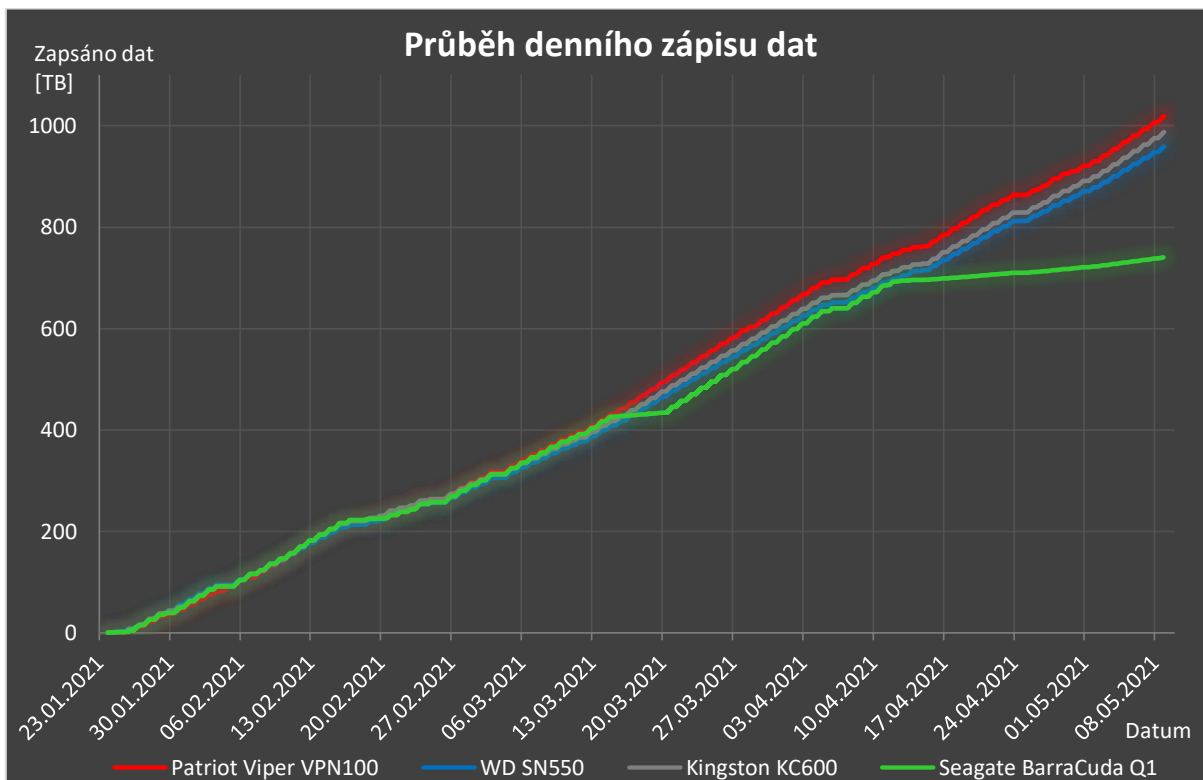
Druhým parametrem se nastavuje maximální počet souborů, které program během jednoho cyklu vytvoří. Tato hodnota byla zadávána s ohledem na volnou kapacitu konkrétního SSD disku, tedy v rozmezí od 140 do 160 tisíc souborů, kromě modelu BarraCuda, u kterého byla zadávána hodnota 28 000. Jak se totiž později ukázalo, zejména u tohoto disku závisela rychlost zapisování právě na tomto parametru. Poslední volený parametr udávající počet cyklů, které program vykoná před zastavením, byl ponechán na výchozí hodnotě.

V barevné části, přesněji v levém sloupci, řádky s modrým pozadím zobrazují součty všech sledovaných hodnot. První dva ukazují celkový počet zapsaných dat v GiB a v TiB. Třetí celkový počet vytvořených souborů a čtvrtý data zapsaná náhodným přístupem, udávaná v MiB, poslední pak aktuální průměrnou rychlost zápisu.

V pravém sloupci, v řádcích se zeleným pozadím se zobrazuje aktuální odhadovaná rychlost zápisu v MiB za sekundu, GiB za hodinu a TiB za den. Oranžový řádek informuje o aktuální hodnotě volného místa na disku. Poslední, modře zbarvený řádek v pravém sloupci uvádí počet MD5 hashovacích testů a za lomítkem počet v nich nalezených chyb. Okno v pravé části slouží pro jejich výpis, pod ním jsou již ovládací tlačítka pro spuštění a zastavení zápisu. Další po stisknutí zobrazí dosavadní výsledky s možností exportu do souboru s koncovkou csv a poslední tlačítko umožňuje spuštění zmiňovaného testu integrity dat.



Dlouhodobé zatěžování všech disků tímto programem započalo 23. ledna 2021 a bylo ukončeno 8. 5. 2021. Při odečtení šesti dní, ve kterých nebylo spuštěno, tak celkově probíhalo přesně 100 dní. Přestože by ideální bylo nechat program spuštěný na všech discích 24 hodin denně, po celou dobu testování, nebylo to v tomto případě možné, avšak lze říci, že dosažené výsledky, i tak dalece přesahují rámec toho, čemu jsou takováto zařízení běžně za dobu své aktivní činnosti vystaveny. Celkový průběh tohoto dlouhodobého testu je vykreslen do grafu na obr. 48.



Obrázek 48: Průběh dlouhodobého testu životnosti SSD disků

Při důkladném ohledání tohoto grafu, lze spatřit šest krátkých vodorovných úseků, kdy se hodnota celkového množství zapsaných dat nezvyšovala, to odpovídá zmíněným šesti dnům, kdy zatěžování nebylo spuštěno. I přesto, že bylo na všech discích spuštěno zhruba po stejnou dobu, lze si na tomto grafu všimnout, že údaj o celkovém počtu zapsaných dat se mezi nimi liší, což je dáno hlavně rychlostí samotného zápisu.

Ačkoliv se u žádného z SSD disků v průběhu testování neobjevila jediná chyba zápisu, v jeho poslední třetině model BarraCuda, s paměťovými buňkami QLC, začal vykazovat první známky opotřebení tím, že se u něj snížila rychlost zápisu. Při podobném testu, provedeném redaktory internetového portálu The Tech Report, byl právě tento jev u určitých SSD disků, prvním náznakem blížícího se konce jejich životnosti. Tento a také model od Kingstonu

disponují informací, o zbývající procentuální životnosti pomocí funkce S.M.A.R.T. Tato hodnota se u modelu BarraCuda dostala na nulu poměrně brzy, přesně 31. 1. 2021, kdy v tu dobu bylo na disku zapsáno 56 TB. Nedlouho poté se ale tato hodnota opět vrátila na 100% a tam setrvala až do doby ukončení testu. Model KC600 podobně oznámil nula procent životnosti 27. 3. 2021, při zapsaných 564 terabajtech. U tohoto SSD ale hodnota na nula procentech setrvala. Důležitější však je, že nevykázal žádné známky opotřebení buněk a rychlost zápisu v tomto testu si zachoval na hodnotě podobné, jaké dosahovaly dražší NVMe modely. V tab. 10 jsou shrnuta všechna zjištěná data. [97]

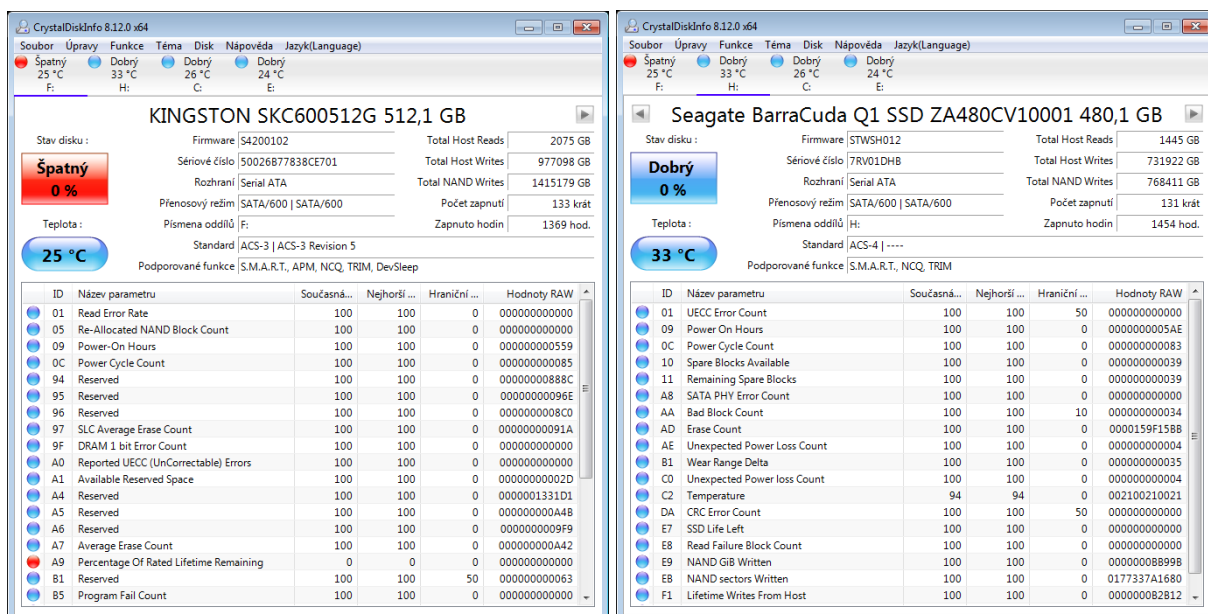
Model Parametr	Seagate Barracuda Q1	Kingston KC600	WD Blue SN550	Patriot Viper VPN100
TBW [TB]	110	300	300	800
Celkem zapsáno dat [TB]	740	987	958	1 019
Splnění údavané životnosti [%]	672	329	319	127
Průměrná rychlost zápisu [MB/s]	183	252	241	271
Celková doba zátěže [Dnů]	46,8	45,3	46,1	43,5

*Tabulka 10: Shrnutí celkových dat dlouhodobého zatěžování*

Hodnota TBW uvedená v prvním řádku představuje výrobcem specifikovanou životnost, určující po kolika zapsaných terabajtech dat, dojde k opotřebení prvních paměťových buněk, řádek druhý pak informuje o skutečné, v tomto testu dosažené hodnotě. Při srovnání obou těchto hodnot je patrné, že výrobcem udávaná životnost byla u všech překročena, přičemž u některých několiknásobně, o kolik pak uvádí procentuální údaj v řádku 3.

Je důležité také objasnit, že rychlost zápisu v tomto testu neodpovídá žádnému z výsledků naměřených v jiných programech, jelikož jde o kombinaci sekvenčního a náhodného přístupu. V tomto ohledu si lze všimnout nižší hodnoty u modelu Q1, který na své rychlosti zápisu nejvíce tratil právě v poslední třetině dlouhodobého testu. Dle hodnoty uvedené v řádku posledním, byl také zatěžován po nejdelší dobu čistého času. Rozdíl v této hodnotě mezi jednotlivými disky je zapříčiněn přerušováním zatěžování z důvodu ověřování jiných testů.

Hodnota celkově zapsaných dat pro jednotlivé SSD disky, uvedená v této tabulce přitom zahrnuje pouze tento dlouhodobý test provedený funkcí SSD Endurance programu Anvil's Storage Utilities. O tom, že celkově bude tato hodnota o něco málo vyšší, svědčí fakt, že na každý z disků byly také nainstalovány čtyři hry a hlavně několikrát proběhl test rychlosti zápisu programem HD Tune Pro, který pokaždé disky zcela přepsal. Tento rozdíl by ale měl být v řádu jednotek TB. Konečně u obou SATA SSD, které na rozdíl od vybraných NVMe disků podporují funkci S.M.A.R.T., se podařilo pomocí programu CrystalDiskInfo informaci o celkové hodnotě zapsaných dat dohledat a k vidění jsou na obr. 49.



Obrázek 49: Informace zjištěné pomocí funkce S.M.A.R.T. programem CrystalDiskInfo

I přesto, že by zde měli být započteny naprosto všechna zapsaná data, tak položka Total Host Writes kupodivu indikuje u obou disků nižší hodnoty, než které byly výstupem z dlouhodobého testu, avšak jedná se pouze o rozdíl přibližně 1,2 %. To může být zapříčiněno rozdílnými způsoby měření obou těchto metod.

Mnohem zajímavější informací, získanou z těchto obrázků podává parametr Total NAND Writes, který k celkové hodnotě dat zapsaných uživatelem, přidává i v teoretické části zmíněné zápisy, jež mají za cíl prodloužit životnost SSD disků. Rozdíl těchto dvou hodnot pak určuje hodnotu Write Amplification, kterou se výrobci snaží co nejvíce redukovat, v ideálním případě pod hranici dvaceti procent. Dle těchto dat se tak daří SSD od Seagate, u kterého Write Amplification tvoří necelých 5 %, z celkově zapsaných dat. Mnohem hůře v tomto ohledu obstál disk od Kingstonu, u kterého tato hodnota dosahuje téměř 45 %. Takto propastný rozdíl může být způsoben v odlišném přístupu daného výrobce ke stanovení velikosti Over

Provisioning prostoru. Společnosti většinou tvrdí, že tento prostor tvoří minimálně 7 % celkové kapacity disku, přičemž u modelu BarraCuda tomu tak i nejspíše bude, jelikož disponuje pro uživatele dostupným prostorem 480 GB, oproti 512 gigabajtům, které nabízí Kingston. Značná část Write Amplification se tak u modelu BarraCuda nejspíše odehrává v tomto prostoru a proto se nepřičítá do statistik Total NAND Writes.

Informace o celkovém množství zapsaných dat, získaná při dlouhodobém zatěžování neustálým zápisem je pro lepší pochopení jejich objemu, nyní nutné uvést do kontextu denního užívání paměťových úložišť. K tomuto účelu tak slouží tab. 11, ve které je vypracován odhad životnosti testovaných disků, na základě dosaženého množství zapsaných dat v kontextu různé velikosti denního zápisu.

Model Denní zápis	Seagate Barracuda Q1	Kingston KC600	WD Blue SN550	Patriot Viper VPN100
1 GB	2 026 let	2 702,3 let	2 622,9 let	2 789,9 let
5 GB	405,2 let	540,5 let	524,6 let	558 let
10 GB	202,6 let	270,2 let	262,3 let	279 let
50 GB	40,5 let	54 let	52,5 let	55,8 let
100 GB	20,3 let	27 let	26,2 let	27,9 let
500 GB	4,1 let	5,4 let	5,2 let	5,6 let
1 000 GB	2 roky	2,7 let	2,6 let	2,8 let

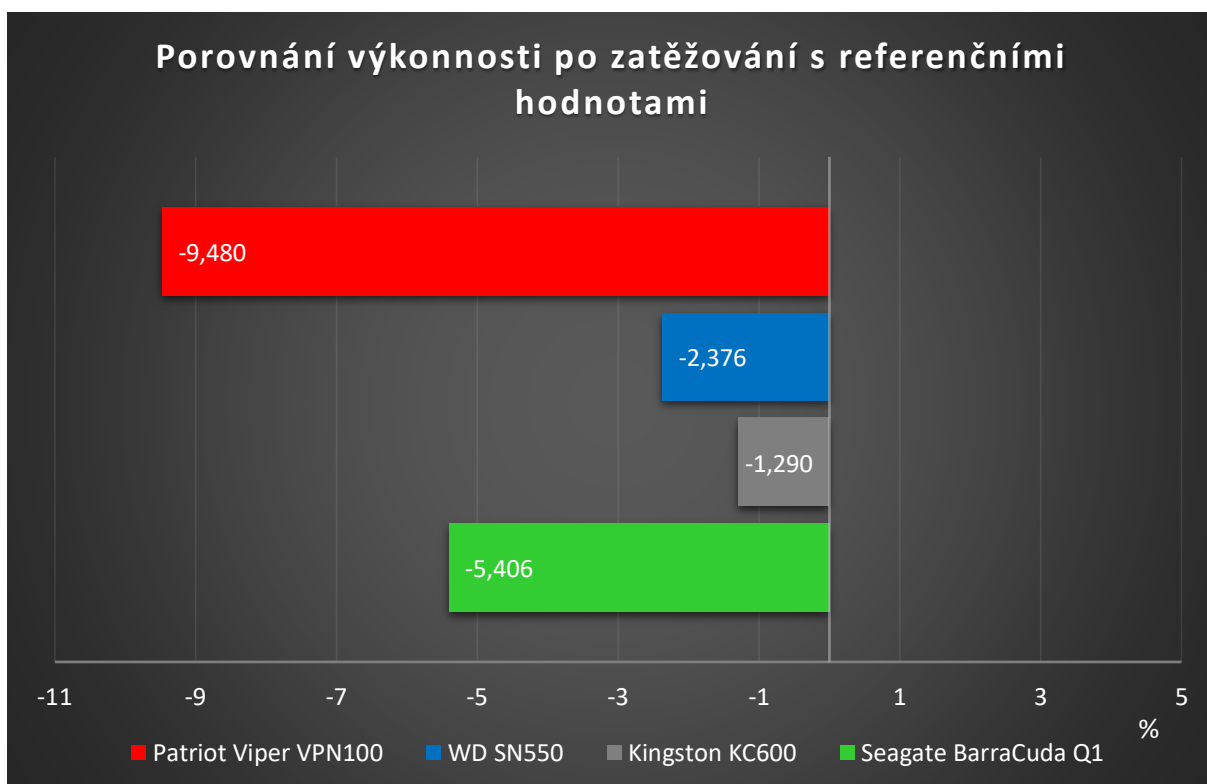
*Tabulka 11: Přehled odovídající dosažené výdrže SSD disků, dle hodnoty denního zápisu dat*

Z těchto vypočtených údajů lze s ohledem na obavy z potenciální životnosti, za hodné povšimnutí označit až hodnoty odpovídající 500 GB dat zapsaných za den, jelikož nikdo v dnešní době nejspíše nepočítá s používáním jednoho počítače po dobu 20 let, nehledě na to, že po tuto dobu by nejspíše fungovat nevydržel ani běžný pevný disk. Z testovaných SSD by u toho, na který bylo zapsáno nejméně dat a jehož životnost se již nejspíše chýlí ke konci, 500 GB zapsaných dat znamenalo 4 roky životnosti, u dvojnásobku pak logicky o polovinu méně, přičemž je nutné opět zmínit, že dosažené hodnoty při tomto testování stále neznamenal jeho úplný konec životnosti.

Je třeba si však také uvědomit, jak velké množství dat odpovídá hodnotě 500, neřku-li 1 000 gigabajtům, zejména pak v kontextu jejich denního zápisu. Nejjednodušeji to lze vysvětlit tak, že by uživatel denně disk jedenkrát, respektive dvakrát celý přepsal zcela novými daty. Mezi běžně užívaná data, která obecně vyžadují nejvíce paměťového prostoru, bezesporu patří videa. V tomto ohledu tak 500 GB úložného prostoru odpovídá přibližně čtrnáctihodinovému záznamu, který byl pořízen v typickém formátu H.264, při rozlišení 1080p. [103]

Dle více než dvouletého průzkumu, provedeném na diskuzním portále Fórum Živě, který proběhl mezi lety 2012 až 2014, byla vypočtena průměrná hodnota 271,9 GB zapsaných dat za jeden kalendářní měsíc. Tento údaj tedy po přepočtu na denní zápis odpovídá hodnotě o něco málo vyšší, než 9 GB dat za den. Při opětovném pohledu na tab. 11, tak lze usoudit, že i kdyby tento vypočtený průměr znamenal dnes pro náročnějšího uživatele desetinu jeho potřeby, jednalo by se i tak o odhadovanou životnost delší, než 20 let. Tímto zjištěním, lze směle konstatovat, že životnost SSD disků by běžným ani náročnějším uživatelům neměla v žádném případě dělat starosti. [104]

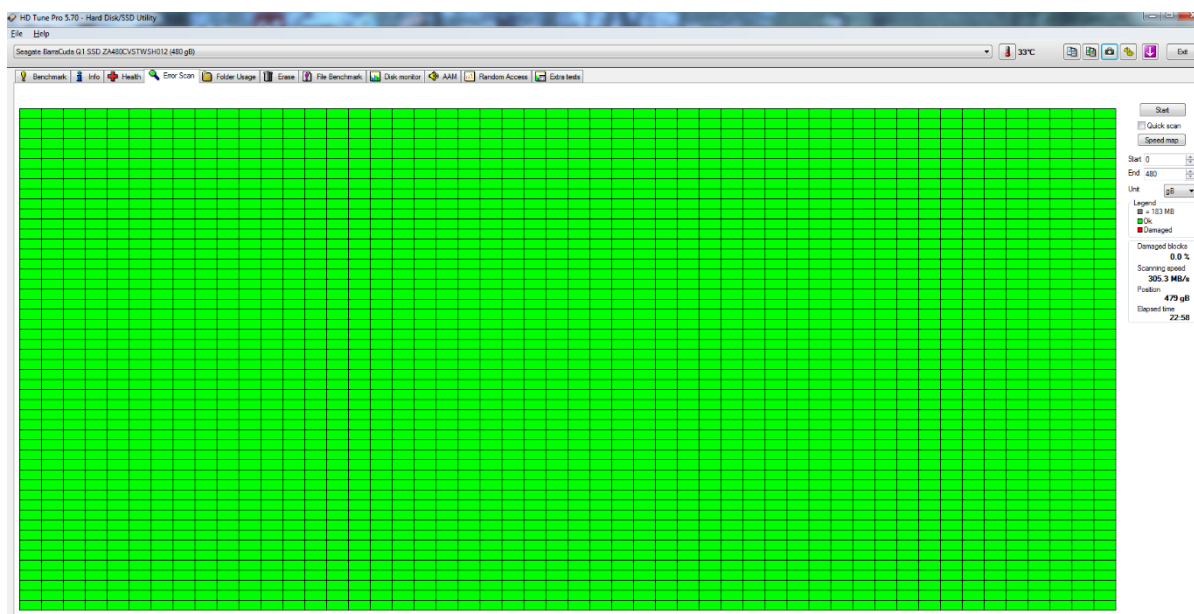
Na závěr byly také znovu provedeny všechny syntetické testy, jejichž výsledky byly následně porovnány s těmi, které byly změřeny na zcela nových discích, za účelem zjištění, zda SSD disky po čase neztrácejí pouze ze své životnosti, ale také na výkonnosti. Veškeré měřené hodnoty byly tedy porovnány procentuálním poměrem a u každého z disků byly z vypočtených dat odstraněny tři nejpozitivnější a tři nejvíce negativní výsledky. Ze zbylých 37 hodnot byla následně vypočtena průměrná hodnota, která byla zanesena do grafu na obr. 50.



Obrázek 50: Rozdíl výkonu použitých SSD disků oproti referenčním hodnotám

Vzhledem k výraznému snížení hodnoty dosahovaného denního zápisu v SSD Endurance, u modelu BarraCuda, bylo očekávané, že právě tento disk ze svého původního výkonu ztratí nejvíce. Jak se nakonec ukázalo, nejhůře v tomto srovnání dopadl ten, který teprve nedávno překonal hranici své udávané životnosti, přestože na rychlosti zápisu při zatěžování nijak nepolevil.

Oblasti, ve kterých se jednotlivé SSD disky oproti svým původním výsledkům zlepšily či pohoršily, se v mnoha případech liší. Existují však případy, ve kterých došlo ke shodě, jako např. u přístupové doby při čtení, kde byly nově naměřené hodnoty až o 70 procent horší. Naopak ani v jednom ze 33 měřených oblastí nedošlo ke zlepšení všech čtyřech disků zároveň. Jak ostatně tento graf napovídá, nejlépe si v tomto ohledu vedl model Kingston KC600, který se zlepšil v nejvíce a zároveň výrazně zhoršil v nejméně případech. Poté již posledním krokem praktického měření, byla kontrola sektorů jednotlivých SSD disků pomocí funkce Error Scan programu HD Tune Pro, jejíž výsledek lze vidět na obr. 51.

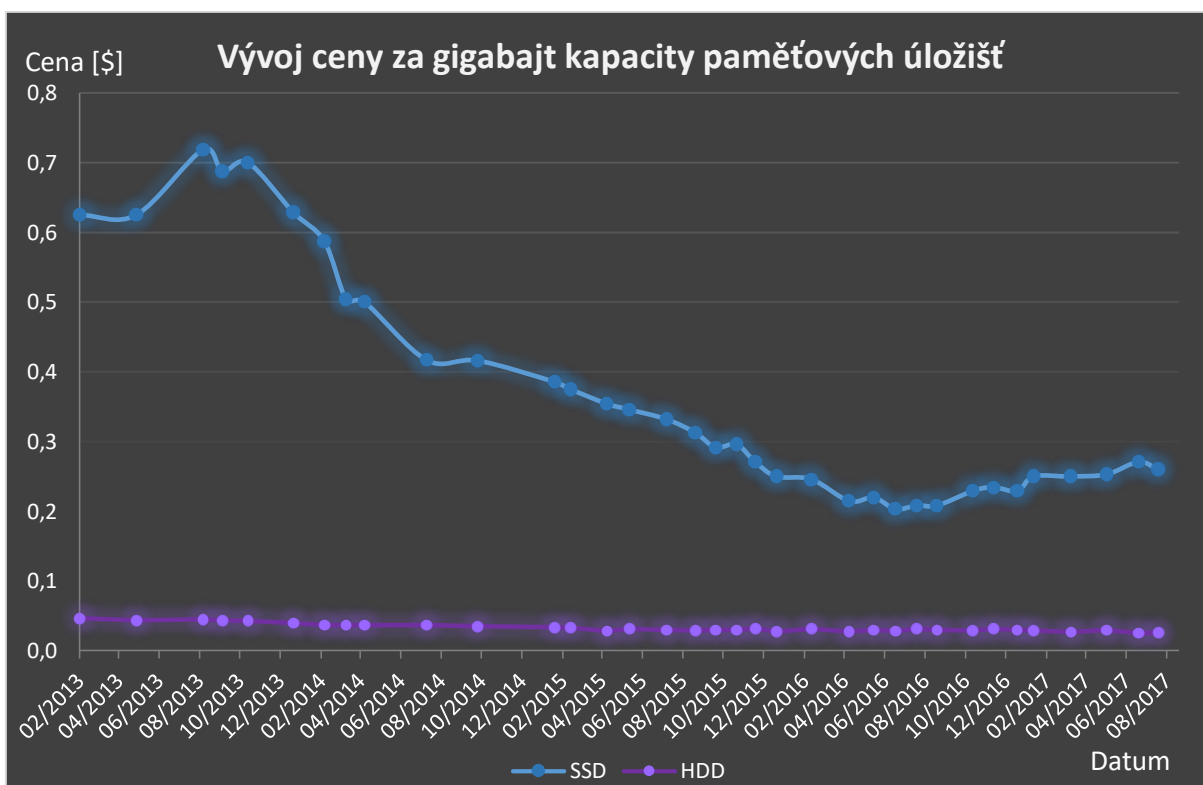


Obrázek 51: Závěrečná kontrola sektorů pomocí funkce Error Scan programu HD Tune Pro

Tento test samozřejmě proběhl na všech discích, pro přehlednost byl zde ale umístěn pouze obrázek z kontroly SSD, který snížením rychlosti denního zápisu, při zatěžování vykázal potenciálně nejkratší životnost, jež vzhledem k použití paměťových buněk QLC a také výrobci udávané nejnižší hodnotě parametru TBW, byla jako nejkratší také očekávaná. Z obr. 51 je ale dle indikace zelenou barvou ve všech sektorech patrné, že žádný z nich poškození nevykázal.

## 6.5. Ekonomické zhodnocení

Mnohokrát v této práci bylo zmíněno, že hlavním finančním ukazatelem při koupi datového úložiště, je cena za gigabajt kapacity, kterou nabízí. Ta po několik let od představení SSD disků, pro tato zařízení vyznívala oproti jejich hlavnímu konkurentovi negativně. Výrobci jednak museli pokrýt finančně nákladný vývoj zcela nového typu hardwaru a technologie prvních paměťových buněk rovněž umožňovala do jedné z nich zapsat nejprve pouze jeden bit, proto nebylo možné pevným diskům konkurovat ani v samotné nabízené kapacitě. Za více než deset let ale výrobci SSD disků, nebo jejich důležitých částí ušli nemalý kus vývojové cesty, což se projevilo nejenom na ceně, ale i na dalších ukazatelích důležitosti tohoto zařízení, pro dnešní svět výpočetní techniky. Vývoj ceny za gigabajt kapacity SSD disků lze vidět na obr. 52.



Obrázek 52: Vývoj ceny za gigabajt SSD a pevných disků [98]

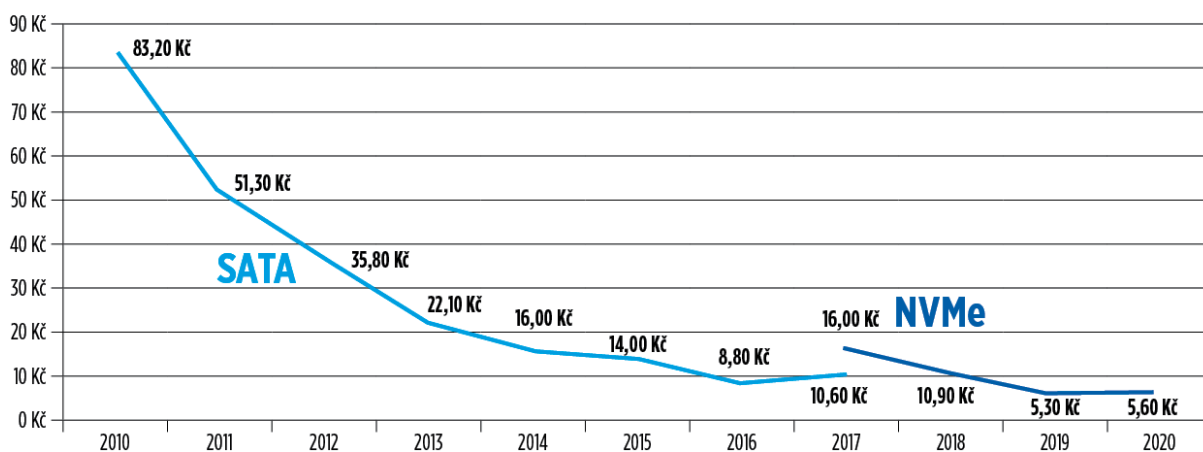
Ceny v tomto grafu, uvedené amerických dolarech zahrnují pouze období z let 2013 až 2017, přesto se jedná o velmi kvalitní zdroj dat, který jako jeden z mála nalezených, obsahuje informace o cenách obou zařízení, jejich převod na české koruny by mohl být nepřesný z důvodu proměnného měnového kurzu. Tato data byla citovanými autory posbírána ze serveru NewEgg.com, přičemž zahrnují nejnížší hodnoty dostupných cen.



Cena za gigabajt úložného prostoru v případě pevných disků je prakticky neměnná, a i když jí SSD ani v roce 2017 nebyly schopné konkurovat, klesající cenový trend je více než patrný. Pro české spotřebitele mohou být relevantnější, rovněž aktuálnější data časopisu Computer, získaná při jejich dlouhodobém recenzování těchto zařízení. Data na obr. 53, berou v potaz také cenový rozdíl mezi SSD využívající rozhraní SATA a standard NVMe.

## SSD: VÝVOJ PRŮMĚRNÉ CENY ZA 1 GB

(PRŮMĚRY CEN VYCHÁZEJÍ Z VELKÝCH TESTŮ SSD V COMPUTERU)



Obrázek 53: Srovnání vývoje průměrné ceny SATA a NVMe SSD [100]

Křivka vývoje ceny SATA SSD disků je na první pohled plynulejší, než ta grafu v předchozím, avšak jde pouze o jednu hodnotu ročně, zatímco data předešlého grafu byla aktualizována maximálně s dvouměsíčním odstupem. Věrohodnost obou grafů potvrzuje jejich shodné zachycení nejvýhodnější ceny SATA SSD v roce 2016, následované mírně vzestupnou tendencí v roce 2017.

Přestože NVMe SSD jsou na trhu k dispozici již od roku 2015, data magazínu Computer o těchto discích sahají jen do roku 2017. Od té doby klesla jejich průměrná cena za gigabajt kapacity téměř na třetinu. Tento graf také naznačuje, že cenový rozdíl mezi oběma typy rozhraní se nadále zužuje. Situaci na současném trhu ohledně odlišnosti cen za gigabajt kapacity, nejen mezi jednotlivými zařízeními a jejich rozhraními, ale také dle cenových kategorií shrnuje tab. 12.

Druh zařízení Kategorie	SATA SSD	NVMe SSD	HDD
Nejlevnější	Crucial BX500	Kingston NV1	WD Blue 5 400 rpm
	2,154 Kč/GB	2,459 Kč/GB	0,899 Kč/GB
Kvalitní	Samsung 870 Evo	Samsung 970 Evo	WD Blue 7 200 rpm
	2,966 Kč/GB	3,489 Kč/GB	0,930 Kč/GB

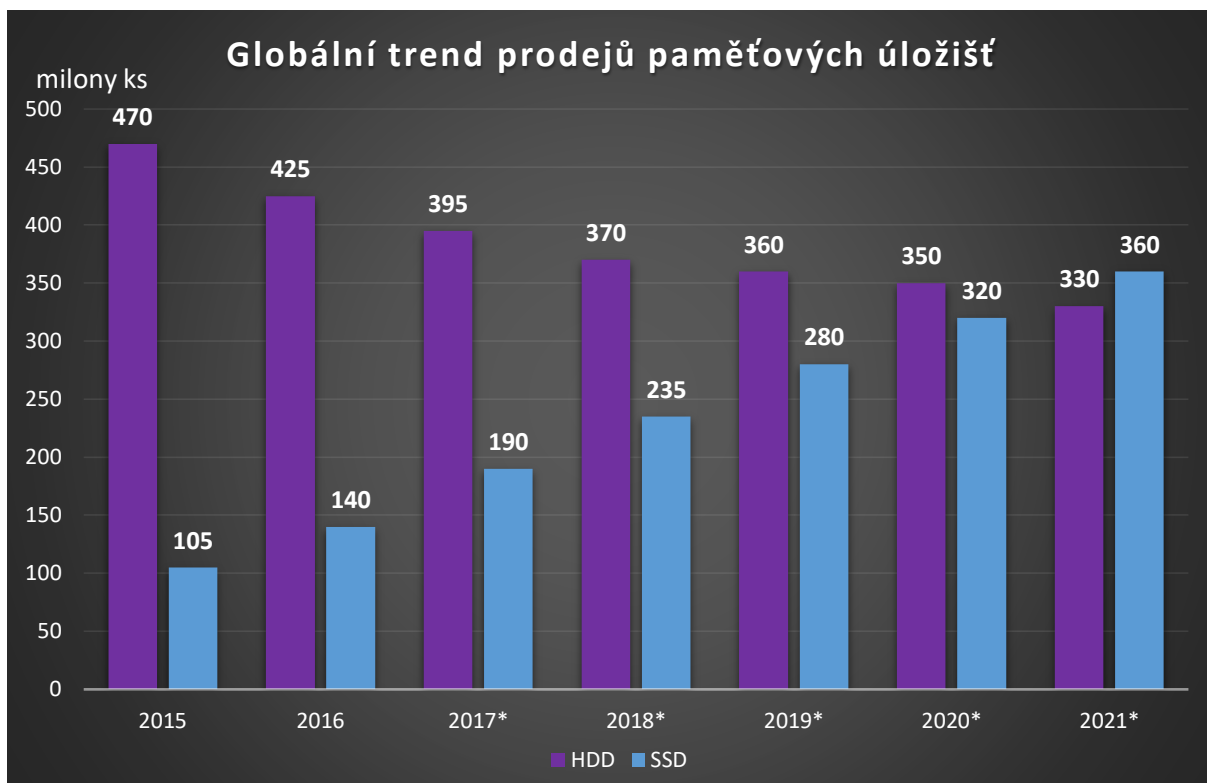
*Tabulka 12: Srovnání aktuálních cen za gigabajt kapacity paměťových úložišť [99]*

I dle současných nabídek je zřejmé, že pevné disky jsou stále výhodnější volbou, pokud je jediným kritériem při volbě právě pouze cena za gigabajt. Zdrojem dat tab. 12 byl portál Heureka.cz, s platností cen k začátku května 2021, přičemž vybrána byla zařízení s kapacitou 1 TB. Zároveň jde vždy o nejlevnější nabídky bez zahrnutí cen za dopravu.

I v nejlevnější kategorii jsou SSD disky stále dvakrát dražší, než HDD a míří-li zákazník na modely vyšší třídy, zaplatí si za SSD i třikrát více, stále však nejde o ty vůbec nejdražší modely SSD ani HDD, které lze na trhu najít. Výsledek této tabulky přináší odpověď na otázku, proč jsou a ještě nějakou chvíli budou pevné disky relevantním paměťovým úložištěm, zejména pro uživatele, kteří potřebují vysokou kapacitu (např. 2 TB a více) a nehodlají si za SSD připlatit o tolik více.

Přidáme-li ale do úvahy i rozdíl ve výkonnosti těchto dvou zařízení, který byl taktéž ověřen v této diplomové práci, dojdeme k závěru, že v tomto ohledu HDD za SSD zaostává mnohonásobně více, než jaký je mezi nimi rozdíl v ceně. Z technického pohledu a výsledků zde zjištěných, je faktem že SSD disk až 24násobně překonal HDD v rychlosti sekvenčního a dokonce až stonásobně v případě náhodného čtení.

V praxi to pak znamená, že se uživatelé po spuštění počítače operační systém načte namísto minuty, za 15 sekund a počítačová hra, či jiný program běžně více jak třikrát rychleji. Jednou investované peníze do SSD disku se tak vyplatí při každodenním použití, pro běžné uživatele právě do tohoto, než do jakéhokoliv jiného hardwaru. O vzestupné popularitě SSD disků rovněž vypovídá následující graf (obr. 54).



Obrázek 54: Prodeje SSD a HDD disků v milionech kusů mezi lety 2015-2021 [101]

Předobraz tohoto grafu, jehož zdrojem dat je renomovaný statistický web Statista.com, byl vytvořen v roce 2016, proto další roky, označené hvězdičkou byly pouhým předpokladem následujícího vývoje. Informace z aktuálního citovaného zdroje, uvádějí za rok 2020 již reálnou hodnotu, která činí dokonce 333,12 milionů prodaných kusů SSD disků, oproti pouhým necelým 260 milionům prodaných pevných disků. Z celkově prodané paměťové kapacity obou těchto zařízení, činící 1 225,71 EB, ale kapacita SSD disků tvoří pouhých necelých 17 procent, což pouze potvrzuje výrok z předchozího odstavce. [102]

Předtím než budou moci být doporučeny konfigurace paměťových úložišť do vybraných počítačových sestav, je vhodné zjistit, jakou měrou se tento typ hardwaru podílí na jejich celkové pořizovací ceně. Je-li dedikovaná grafická karta součástí takové sestavy, bývá společně s procesorem tou nejdražší částí samotného počítače. Právě tyto dvě komponenty také určují celkový výpočetní výkon a rovněž se pohybují v největším cenovém rozmezí. Lze také usoudit, že dle nároků na samotný výkon počítače se odvíjí také požadavky na celkovou kapacitu paměťového úložiště. V případě, že jsou tyto nároky průměrného charakteru, patří paměťová úložiště mezi levnější, až středně drahé komponenty.

Vezmeme-li pro začátek základního uživatele, kterému počítač slouží zejména k prohlížení internetu, použití základních programů a jeho nároky na kapacitu paměti jsou minimální. Pro něj lze doporučit například jeden samostatný SSD disk, podobný zde testovaným, tedy s pamětí o kapacitě 500 GB. Jsou-li pro takového uživatele požadavky vyšší na kapacitu, než na plynulost a rychlost práce s jeho počítačem, bude zřejmě s omezeným rozpočtem muset sáhnout po pevném disku.

Nejčastější konfigurací pro středně náročné uživatele nejspíše bude kombinace obou zařízení, tedy HDD s vysokou kapacitou, pro méně používaná data a SSD disk, na kterém bude nainstalován operační systém s dalšími často využívanými programy, rovněž s postačující kapacitou okolo 500 GB. Pro samotný OS, lze s omezenějším rozpočtem zvolit také SSD o poloviční kapacitě.

Jelikož s grafickou náročností nových počítačových her, roste i pro ně potřebná velikost úložného místa na disku, tak pro náročnější hráče lze doporučit stejnou konfiguraci, s SSD diskem o větší kapacitě, či jedním SATA SSD navíc, přímo na hry určeným. SSD disky se standardem NVMe lze primárně doporučit uživatelům, kteří často přesunují velké množství dat. Jejich cena oproti SATA SSD již nebývá o tolik vyšší, připlatit si za ně už jen kvůli tomuto ohledu se ale rozhodně vyplatí, i když při práci s daty náhodným přístupem, výkonnostně vyčnívají zejména pouze dražší modely, v rychlosti načítání her nijak nad SATA SSD nevyčnívají. Spotřebitelé s vysokými nároky a velkým rozpočtem se nejspíše již pevnému disku vyhnou a zvolí kombinaci několika vysokokapacitních SSD.

## 7. Závěr

Upozadíme-li srovnání výkonnosti dostupných paměťových úložišť, s jejímž rozložením je široká veřejnost lépe obeznámená, bylo primárním cílem této práce prověřit a případně vyvrátit obecně rozšířené obavy z potenciálně omezené životnosti, výkonnostně nadřazených SSD disků.

Pro shrnutí lze uvést, že ze zjištěných výsledků, zaměřených na výkonnost, lze potvrdit, že s obvyklými uživatelskými daty umí SSD disk pracovat běžně 25krát a s těmi systémovými dokonce až 100x rychleji. Jejich současná výše ceny za gigabajt úložného prostoru, se přitom pohybuje v nižších jednotkách násobků ceny pevných disků. Bylo také potvrzeno, že výhodnost poměru ceny a výkonu SSD disků, se podepisuje i na celosvětových statistikách, zabývajících se počty prodaných kusů, ve kterých v loňském roce pevné disky překonaly o 28 %. Obrovská převaha HDD v poměru čistě prodané celkové kapacity, ale demonstruje, že tento dlouhá léta jediný, byť v dnešní době již trochu zastaralý hardware, má stále své opodstatnění, zejména při nabízené kapacitě o velikosti 2 TB a výše.

Podobně jako v případě ceny si SSD disky do určité doby prošly vývojem se sestupnou tendencí i v oblasti jejich životnosti, což naopak vyznívalo v jejich prospěch negativně. S přechodem na třídímenzionální technologii výroby a s tím spojeným přepracovaným řešením paměťových buněk, včetně použitých materiálů, byl ale tento nepříznivý trend přinejmenším pozastaven. Nyní je tak možné do každé z buněk ukládat i čtyřbitovou informaci a disky přitom vydrží bez větších problémů fungovat i po zapsání stovek terabajtů dat, což je hodnota, které se běžný uživatel, za dobu než dojde k technologickému zestárnutí jeho počítače, ani nepřiblíží. Při průzkumu zabývajícím se tímto hlediskem, bylo zjištěno, že průměrný denní zápis běžného uživatele na jeho SSD disk se blíží spíše deseti, než padesáti gigabajtům. I kdyby vyšší z těchto odhadovaných hodnot, pro náročnější uživatele představoval čtvrtinu jejich potřeby, tak by i z nejnižších dosažených hodnot v této práci znamenala výdrž delší, než 10 let. Je také nutno podotknout, že dosažené výsledky, nepředstavují v tomto případě konečnou hodnotu, znamenající selhání disku. Na úplný závěr je zapotřebí dodat, že zde zjištěné výsledky a z nich vyvozené závěry, lze stoprocentně objektivně vztáhnout pouze k modelům zde testovaným. Pro jejich úplné, všeobecně aplikovatelné potvrzení, by bylo nutné otestovat mnohem větší počet těchto zařízení, rovněž po značně delší dobu.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] – ENGLANDER, I. *The Architecture of Computer Hardware, Systems Software, & Networking: An Information Technology Approach*. Fifth edition. Bentley University (Massachussets), 2014. ISBN 978–1–118–32263–5.
- [2] – SearchStorage Techtarget. *RAM (Random Access Memory)*. [online]. [cit. 1.10.2020]. <https://searchstorage.techtarget.com/definition/RAM-random-access-memory>.
- [3] – Fakulta informatiky MU. *Vnitřní paměti*. [online]. [cit. 10.10.2020]. <https://www.fi.muni.cz/usr/pelikan/ARCHIT/TEXTY/INTPAM.HTML#DRAM/>.
- [4] – OLIVKA, P. – KRČMÁŘ M. *Paměti počítačů: Studijní materiál pro předmět Architektury počítačů*. Katedra informatiky FEI VŠB-TU Ostrava. 2005. [online]. [cit. 13.10.2020]. Dostupné z: <http://poli.cs.vsb.cz/edu/arp/down/pameti.pdf>.
- [5] – Computer Science and Engineering UC San Diego. *Cache Design*. [online]. [cit. 17.10.2020]. Dostupné z: <http://poli.cs.vsb.cz/edu/arp/down/pameti.pdf>.
- [6] – CPU-World. [online]. [cit 20.10.2020]. [https://www.cpu-world.com/CPUs/Core\\_i7/Intel-Core%20i7%20i7-10700K.html](https://www.cpu-world.com/CPUs/Core_i7/Intel-Core%20i7%20i7-10700K.html), <https://www.cpu-world.com/CPUs/Zen/AMD-Ryzen%205%205600X.html>, [https://www.cpu-world.com/CPUs/Core\\_i5/Intel-Core%20i5%20i5-9600.html](https://www.cpu-world.com/CPUs/Core_i5/Intel-Core%20i5%20i5-9600.html), <https://www.cpu-world.com/CPUs/Zen/AMD-Ryzen%205%203600.html>.
- [7] – SlidePlayer. *Cache Memories*. [online]. [cit. 20.10.2020] Dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/11684865/65/images/67/What+about+writes+Multiple+copies+of+data+exist%3A.jpg>.
- [8] – MUELLER, Scott. *Osobní počítač: hardware, upgrade, opravy*. 1 vyd. Překlad Milan Daněk. Brno: Computer Press, 2003, xxv, 862 s. Hardware. ISBN 80-722-6796-5.
- [9] – Střední průmyslová škola Brno. *Vnitřní paměti*. [online]. [cit. 23.10.2020]. Dostupné z: [https://moodle.sspbrno.cz/pluginfile.php/6900/mod\\_resource/content/1/Vn%C4%9Bj%C5%A1%C3%AD%20pam%C4%9Bti.pdf](https://moodle.sspbrno.cz/pluginfile.php/6900/mod_resource/content/1/Vn%C4%9Bj%C5%A1%C3%AD%20pam%C4%9Bti.pdf).

- [10] – University of Massachusetts, Amherst. *Hard Drives: How They Work?*. [online]. [cit. 25.10.2020.] Dostupné z: <http://storageprocess.weebly.com/uploads/1/7/3/1/17314496/3956138.png?371>.
- [11] – SearchStorage Techtarget. *Zoned-bit recording (ZBR)*. [online]. [cit. 26.10.2020]. <https://searchstorage.techtarget.com/definition/zoned-bit-recording>.
- [12] – Svět Hardware. *Funkčnost, rozhraní a technologie pevných disků*. [online]. [cit. 30.10.2020]. <https://www.svethardware.cz/funkcnost-rozhrani-a-technologie-pevnych-disku/16088D>.
- [13] – NAS Servery. *Jak vybrat NAS server – průvodce*. [online]. [cit. 3.11.2020]. <http://www.nasservery.cz/jak-vybrat-nas-server-pruvodce/>.
- [14] – AnandTech. *Analyzing Intel-Micron 3D XPoint: The Next Generation Non-Volatile Memory*. [online]. [cit. 5.11.2020]. <https://www.anandtech.com/show/9470/intel-and-micron-announce-3d-xpoint-nonvolatile-memory-technology-1000x-higher-performance-endurance-than-nand>.
- [15] – PC Perspecitve. *How 3D XPoint Phase-Change Memory Works*. [online]. [cit. 6.11.2020]. <https://pcper.com/2017/06/how-3d-xpoint-phase-change-memory-works/>.
- [16] – AnandTech. *Intel Introduces Optane SSD DC P4800X With 3D XPoint Memory*. [online]. [cit. 4.5.2021]. <https://www.anandtech.com/show/11208/intel-introduces-optane-ssd-dc-p4800x-with-3d-xpoint-memory>.
- [17] – PCGamer. *Intel optane memory: everything you need to know*. [online]. [cit. 8.11.2020]. <https://www.pcgamer.com/intel-optane-memory-everything-you-need-to-know/>.
- [18] – Heureka. [online]. [cit 9.11.2020]. <https://pevne-disky.heureka.cz/crucial-mx500-1tb-ct1000mx500ssd1/>, <https://pevne-disky.heureka.cz/intel-optane-m10-32gb-ssd-mempek1j032ga01/>, [https://pevne-disky.heureka.cz/crucial-mx500-500gb-2\\_5-sataiii-ssd-ct500mx500ssd1/](https://pevne-disky.heureka.cz/crucial-mx500-500gb-2_5-sataiii-ssd-ct500mx500ssd1/).

- [19] – PC Perspective. *Quick Look Review: Intel Optane Memory H10 With Solid State Drive*. [online]. [cit. 10.11.2020]. <https://pcper.com/2019/05/quick-look-review-intel-optane-memory-h10-solid-state-storage/>.
- [20] – SANDVIO, M. A. A. – CHU, F. R. – KULKARNI, A. – SELINGER, R. *NAND Flash Memory and Its Role in Storage Architectures*. 2009. [online].  
Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/224354511\\_NAND\\_Flash\\_Memory\\_and\\_Its\\_Role\\_in\\_Storage\\_Architectures](https://www.researchgate.net/publication/224354511_NAND_Flash_Memory_and_Its_Role_in_Storage_Architectures).
- [21] – MEENA, J. S. – SZE, S. M. – CHAND, U. – TSENG, T. *Overview of Emerging Nonvolatile Memory Technologies*. 2014. [online].  
Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/265727614\\_Overview\\_of\\_Emerging\\_Non-volatile\\_Memory\\_Technologies](https://www.researchgate.net/publication/265727614_Overview_of_Emerging_Non-volatile_Memory_Technologies).
- [22] – SAKIB, S. – KUMARI, P. – TALUKDER, B. – RAHMAN, T. – RAY, B. *Non-Invasive Detection Method for Recycled Flash Memory Using Timing Characteristics*. 2018. [online]. [cit. 20.11.2020]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/a-A-floating-gate-FG-NAND-Flash-memory-cell-which-stores-charge-in-the-FG-Metal\\_fig1\\_327007460](https://www.researchgate.net/figure/a-A-floating-gate-FG-NAND-Flash-memory-cell-which-stores-charge-in-the-FG-Metal_fig1_327007460).
- [23] – SOS Electronic. *Apacer SLC-Lite, spolehlivější než MLC, levnější než SLC*. [online]. [cit. 25.11.2020]. <https://www.soselectronic.cz/articles/apacer/apacer-apacer-slc-lite-spolehlivejsi-nez-mlc-levnejsi-nez-slc-1818>.
- [24] – Eldar. *Technologie Flash pamětí: Principy programování, výmazu a čtení*. [online]. [cit. 4.12.2020]. <https://eldar.cz/manasek/felbox/36nm/flash/principles.htm>.
- [25] – Microcontrolertips. *Tech refresher: Bascis of flash, NAND flash, and NOR flash*. [online]. [cit. 10.12.2020]. <https://www.microcontrollertips.com/tech-refresher-basics-of-flash-nand-flash-and-nor-flash/>.
- [26] – Svět Hardware. *SSD: vývoj, technologie a budoucnost*. [online]. [cit. 14.12.2020]. <https://www.svethardware.cz/ssd-vyvoj-technologie-a-budoucnost/40687-2>.
- [27] – SearchStorage Techtargert. *Floating gate transistor (FGT)*. [online]. [cit. 18.12.2020]. <https://searchstorage.techtargert.com/definition/floating-gate>.



- [28] – Flash Storage. *A Flash Storage Technical and Economic Primer*. [online]. [cit. 20.12.2020]. <https://web.archive.org/web/20150720220844/http://www.flashstorage.com/flash-storage-technical-economic-primer/>.
- [29] – Cnews.cz. *Toshiba/Kioxia po QLC vyvíjí už i PLC NAND. 5bitový záznam může opět snížit životnost*. [online]. [cit. 5.1.2021]. <https://www.cnews.cz/toshiba-kioxia-vyvoj-plc-nand-roadmapa-bics-3d-nand>.
- [30] – KURUC, Jiří. *Cenový pád nejrychlejších SSD*. *Computer*, 2019, 26. ročník, 6/2019, 144 stran.
- [31] – SOS Electronic. *Vítejte ve světě 3D FLASH pamětí*. [online]. [cit. 5.1.2021]. <https://www.soselectronic.cz/articles/apacer/vitejte-ve-svete-3d-flash-pameti-2133>.
- [32] – AnandTech. *Samsung SSD 850 Pro (128GB, 256GB & 1TB) Review: Enter the 3D Era*. [online]. [cit. 7.1.2021]. <https://www.anandtech.com/show/8216/samsung-ssd-850-pro-128gb-256gb-1tb-review-enter-the-3d-era/3>.
- [33] – The Memory Guy. *3D NAND: Making a Vertical String*. [online]. [cit. 8.1.2021]. <https://thememoryguy.com/3d-nand-making-a-vertical-string/>.
- [34] – The Memory Guy. *An Alternative Kind of Vertical 3D NAND String*. [online]. [cit. 9.1.2021]. <https://thememoryguy.com/an-alternative-kind-of-vertical-3d-nand-string/>.
- [35] – AnandTech. *Micron Announces 176-layer 3D NAND*. [online]. [cit. 9.1.2021]. <https://www.anandtech.com/show/16230/micron-announces-176layer-3d-nand>.
- [36] – PCMag. *The Best M.2 Solid-State Drives for 2021*. [online]. [cit. 16.1.2021]. <https://www.pcmag.com/picks/the-best-m2-solid-state-drives>.
- [37] – ByteBiteBit. *What is the Difference: M.2 SATA SSD Vs. M.2 PCI Express (PCIe) SSD*. [online]. [cit. 1.2.2021]. <https://bytebitebit.com/1484/m2-sata-ssd-vs-m2-pcie-ssd/>.

- [38] – Svět Hardware. *Technologie SSD: co je nového?*. [online]. [cit. 1.2.2021]. <https://www.svethardware.cz/technologie-ssd-co-je-noveho/38365-2>.
- [39] – SATA-IO. *Serial ATA: Meeting Storage Needs Today and Tomorrow*. [online]. [cit. 2.2.2021]. <https://sata-io.org/sites/default/files/documents/SATA-Revision-3.0-Press-Release-FINAL-052609.pdf>.
- [40] – TechPowerUp. *SATA-IO Releases Revision 3.1 Specification*. [online]. [cit. 4.2.2021]. <https://www.techpowerup.com/149285/sata-io-releases-revision-3-1-specification>.
- [41] – TechPowerUp. *SATA-IO Announces SATA Revision 3.2 Specification*. [online]. [cit. 4.2.2021]. <https://www.techpowerup.com/188656/sata-io-announces-sata-revision-3-2-specification>.
- [42] – TechPowerUp. *SATA-IO Expands supported features in Revision 3.4 Specification*. [online]. [cit. 4.2.2021]. <https://www.techpowerup.com/245476/sata-io-expands-supported-features-in-revision-3-4-specification>.
- [43] – TechPowerUp. *SATA-IO Increases Interoperability Features with Revision 3.5 Specification*. [online]. [cit. 5.2.2021]. <https://www.techpowerup.com/269946/sata-io-increases-interoperability-features-with-revision-3-5-specification>.
- [44] – StorageReview. *SATA-IO Expands Support, Now Includes SMR*. [online]. [cit. 7.2.2021]. <https://www.storagereview.com/news/sata-io-expands-support-now-includes-smr>.
- [45] – Delkin. *SATA (Serial ATA) Technical Guide*. [online]. [cit. 9.2.2021]. <https://www.delkin.com/blog/sata-serial-ata/>.
- [46] – DRBAL, J. *Implementace rychlých sériových sběrnic v obvodech FPGA*. [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2014. 47 s. Diplomová práce. Vedoucí diplomové práce: Ing. Marián Pristach.

- [47] – Alza.. [online]. [cit. 13.2.2021]. <https://cdn.alza.cz/ImgW.ashx?fd=FotoAddOrig&cd=VENTf2-11&i=1.jpg>.
- [48] – Interfacebus. [online]. [cit. 13.2.2021].  
[http://www.interfacebus.com/sata\\_pinout.jpg](http://www.interfacebus.com/sata_pinout.jpg)
- [49] – Amazon. [online]. [cit. 13.2.2021]. <https://ae01.alicdn.com/kf/H3b2e59f709c1434a9ed4f7fad95864d6m/1Pc-Cable-MINI-4-Pin-Turn-2-SATA-Power-Supply-For-Lenovo-Main-Board-Interface-Small.jpg>.
- [50] – Superuser. [online]. [cit. 14.2.2021]. <https://i.stack.imgur.com/BvmaZ.png>.
- [51] – Notebook. *AHCI – maximální výkon SATA disku*. [online]. [cit. 15.2.2021].  
<https://notebook.cz/clanky/technologie/2007/AHCI>.
- [52] – Intel. *Serial ATA AHCI 1.3.1 Specification*. [online]. [cit. 17.2.2021].  
<https://www.intel.com/content/www/us/en/io/serial-ata/serial-ata-ahci-spec-rev1-3-1.html>.
- [53] – SearchStorage Techtarget. *AHCI (Advanced Host Controller Interface)*. [online]. [cit. 19.2.2021]. <https://searchstorage.techtarget.com/definition/AHCI-Advanced-Host-Controller-Interface>.
- [54] – NVMeexpress. *What is NVMe®?*. [online]. [cit. 22.2.2021]. <https://nvmeexpress.org/>.
- [55] – DHResource. [online]. [cit. 25.2.2021]. <https://www.dhresource.com/0x0/f2/albu/g8/M01/3D/30/rBVaV170RxqAJQsqAAFGo8gG6ss592.jpg/m-2-nvme-ssd-to-pcie-3-0-x4-adapter-m-key.jpg>.
- [56] – KURUC, Jiří. *Mistři rychlosti*. *Computer*, 2020, 27. ročník, 7/2020, 144 stran.
- [57] – SOS Electronic. *M.2 Konektory / klíč k úspěšnému připojení*. [online]. [cit. 29.2.2021]. <https://www.soselectronic.cz/articles/attend/m-2-konektory-klic-k-uspesnemu-pripojenu-2294>.
- [58] – Delock. [online] [cit. 29.2.2021]. [https://www.delock.de/infothek/M.2/images/for\\_mfaktoren-vergleich.jpg](https://www.delock.de/infothek/M.2/images/for_mfaktoren-vergleich.jpg).

- [59] – ATPinc. *What is M.2? Keys and Sockets Explained.* [online]. [cit. 1.3.2021]. <https://www.atpinc.com/blog/what-is-m.2-M-B-BM-key-socket-3>.
- [60] – Acer. [online]. [cit. 1.3.2021]. <https://img.17qq.com/images/csswwrrschx.jpeg>.
- [61] – Assured-Systems. *Understanding M.2 Keys and Sockets for Industrial SSDs.* [online]. [cit. 1.3.2021]. <https://www.assured-systems.com/uk/news/article/understanding-m2-keys-and-sockets-for-industrial-ssds/>.
- [62] – Assured-Systems. *Data Transfer Rate – What it is to Calculate, How to Increase, Rates for USB and Hard Drives.* [online]. [cit. 4.3.2021]. <https://www.cmd-ltd.com/advice-centre/usb-chargers-and-power-modules/usb-and-power-module-product-help/data-transfer-rate/#data-transfer2>.
- [63] – Dell. *Příručka k rozhraní Thunderbolt™ 3.* [online]. [cit. 6.3.2021]. <https://www.dell.com/support/kbdoc/cs-cz/000141309/p%c5%99%c3%adru%c4%8dka-k-rozhran%c3%ad-thunderbolt-3>.
- [64] – Apple King. *USB-C a Thunderbolt 3: Tváří se stejně, ale nejsou.* [online]. [cit. 6.3.2021]. <https://www.appleking.cz/blog/usb-c-thunderbolt-3>.
- [65] – Diit. *USB 3.2 přináší názvoslovný guláš. I USB 3.0 totiž může být USB 3.2.* [online]. [cit. 6.3.2021]. <https://diit.cz/clanek/usb-32-prinasi-nazvoslovnny-gulas>.
- [66] – Amazon. [online]. [cit. 11.3.2021]. <https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/71ssQPwnXEL.AC.SL1200.jpg>.
- [67] – CZC. [online]. [cit. 11.3.2021]. [https://iczc.cz/57ppi9vt1eg9iadns2ceon2mf7-3\\_1/obrazek](https://iczc.cz/57ppi9vt1eg9iadns2ceon2mf7-3_1/obrazek).
- [68] – Datart. [online]. [cit. 11.3.2021]. [https://static.datart.cz/ssd-samsung-evo-860-500gb-cerny/media\\_2993973.jpg?size=800](https://static.datart.cz/ssd-samsung-evo-860-500gb-cerny/media_2993973.jpg?size=800).
- [69] – SearchStorage Techtarget. *Flash Memory Controller.* [online]. [cit. 16.3.2021]. <https://searchstorage.techtarget.com/definition/flash-controller>.
- [70] – StorageReview. *SSD Controller.* [online]. [cit. 17.3.2021]. <https://www.storagereview.com/ssd-controller>.

- [71] – Elinfor. *Overview of SSD Structure and Basic Working Principle*. [online]. [cit. 20.3.2021]. <https://www.elinfor.com/knowledge/overview-of-ssd-structure-and-basic-working-principle2-p-11204>.
- [72] – PC Tuning. *Vše, co jste kdy chtěl vědět o NVMe SSD (a nebáli se zeptat)*. [online]. [cit. 22.3.2021]. <https://pctuning.tyden.cz/hardware/disky-cd-dvd-br/59439-vse-co-jste-kdy-chteli-vedet-o-nvme-ssd-a-nebali-se-zeptat?start=5>.
- [73] – Semiconductor Engineering. *Four Steps To Verifying An SSD Controller With Emulation*. [online]. [cit. 25.3.2021]. <https://semiengineering.com/four-steps-to-verifying-an-ssd-controller-with-emulation/>.
- [74] – SOS Electronic. *Vyznáte se v terminologii a parametrech pro SSD?*. [online]. [cit. 27.3.2021]. <https://www.roselectronic.cz/articles/apacer/vyznate-se-v-terminologii-a-parametrech-pro-ssd-2277>.
- [75] – AnandTech. *The Mushkin Source 500GB SATA SSD Review: A Value Proposition For An Everyday PC: Working Set Size*. [online]. [cit. 28.3.2021]. <https://www.anandtech.com/show/13421/the-mushkin-source-sata-ssd-review/5>.
- [76] – Zeeis. *Flash Translation Layer – FTL for NAND*. [online]. [cit. 1.4.2021]. <https://zeeis.com/flash-translation-layer/>.
- [77] – HANDY, J. *How Controllers Maximize SSD Life*. 2013. [online]. [cit. 5.4.2021]. Dostupné z: [https://www.snia.org/sites/default/files/SSSITECHNOTES\\_HowControllersMaximizeSSDLife.pdf](https://www.snia.org/sites/default/files/SSSITECHNOTES_HowControllersMaximizeSSDLife.pdf).
- [78] – Gamers Nexus. *Understanding SSD Controller Terminology: Overprovisioning & WAF*. [online]. [cit. 5.4.2021]. <https://www.gamersnexus.net/guides/1157-ssd-controller-technology-overprovisioning-waf>.
- [79] – The SSD Review. *Garbage Collection and TRIM in SSDs Explained – An SSD Primer*. [online]. [cit. 5.4.2021]. <https://www.thessdreview.com/daily-news/latest-buzz/garbage-collection-and-trim-in-ssds-explained-an-ssd-primer/>.
- [80] – EDN. *Understanding SSD Over Provisioning*. [online]. [cit. 6.4.2021]. <https://www.edn.com/understanding-ssd-over-provisioning/>.

- [81] – ATPinc. *SSD Endurance: Challenges and Solutions*. [online]. [cit. 6.4.2021]. <https://www.atpinc.com/blog/trim-garbage-collection-ssd-endurance-wai-waf>.
- [82] – The SSD Guy. *SK hynix Acquires Intel's NAND Business*. [online]. [cit. 8.4.2021]. <https://themoryguy.com/sk-hynix-acquires-intels-nand-business/>.
- [83] – Statista. *NAND flash manufacturers revenue worldwide 2010-2020, by quarter*. [online]. [cit. 8.4.2021]. <https://www.statista.com/statistics/275887/nand-flash-manufacturer-sales-worldwide/>.
- [84] – Wikipedia. *List of flash memory controller manufacturers*. [online]. [cit. 9.4.2021]. [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_flash\\_memory\\_controller\\_manufacturers](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_flash_memory_controller_manufacturers).
- [85] – ACELab. *SSD manufacturers, SSD controllers, and a couple of words about the future trends*. [online]. [cit. 9.4.2021]. <https://blog.ancelaboratory.com/ssd-manufacturers-ssd-controllers-and-a-couple-of-words-about-the-future-trends.html>.
- [86] – The SSD Guy. *What is an SSD Trim Command?*. [online]. [cit. 12.4.2021]. <https://thesdsguy.com/what-is-an-ssd-trim-command/>.
- [87] – IT Moov. *Co je vlastně to SSHD? Nápad Seagate udělat rychlejší plotnový disk!*. [online]. [cit. 14.4.2021]. <http://rn.itmoov.eu/co-je-vlastne-to-sshd-napad-seagate-udelat-rychlejsi-plotnovy-disk/>.
- [88] – Svět Hardware. *Seagate uvádí hybridní disky SSHD, 7200RPM 2,5" disky končí*. [online]. [cit. 14.4.2021]. <https://www.svethardware.cz/seagate-uvadi-hybridni-disky-sshd-7200rpm-25-disky-konci/37522>.
- [89] – Gaming Scan. *The Best SSHDs (2021 Reviews)*. [online]. [cit. 15.4.2021]. <https://www.svethardware.cz/seagate-uvadi-hybridni-disky-sshd-7200rpm-25-disky-konci/37522>.
- [90] – StorageReview. *WD Blue SSHD 1TB Review*. [online]. [cit. 15.4.2021]. <https://www.storagereview.com/review/wd-blue-sshd-1tb-review>.

- [91] – Ercim. *Enabling 3D-TLC NAND Flash in Enterprise Storage Systems*. [online]. [cit. 20.4.2021]. <https://ercim-news.ercim.eu/en113/r-i/enabling-3d-tlc-nand-flash-in-enterprise-storage-systems>.
- [92] – Blocks & Files. *WD and TOSH talk up penta-level cell flash*. [online]. [cit. 20.4.2021]. <https://blocksandfiles.com/2019/08/07/penta-level-cell-flash/>.
- [93] – Svět Hardware. *Paměťmi QLC NAND Flash to nekončí, chystají se PLC*. [online]. [cit. 20.4.2020]. <https://www.svethardware.cz/pametmi-qlc-nand-flash-to-nekonci-chystaji-se-plc/50028>.
- [94] – PC Tuning. *Patriot P300 1 TB: Jeden z nejlevnějších disků s NVMe v testu*. [online]. [cit. 18.1.2021]. <https://pctuning.tyden.cz/hardware/disky-cd-dvd-br/60893-patriot-p300-1-tb-jeden-z-nejlevnejsich-disku-s-nvme-v-testu?start=3>.
- [95] – PC Mag. *WD Blue SN550 Review: This 'DRAM-less' M.2 drive delivers solid SSD speed for budget buyers*. [online]. [cit. 19.1.2021]. <https://www.pcmag.com/reviews/wd-blue-sn550>.
- [96] – Start Debugging. *What is the difference between a MegaByte (MB) and a MebiByte (MiB)?*. [online]. [cit. 25.1.2021]. <https://startdebugging.net/2020/08/what-is-the-difference-between-a-megabyte-mb-and-a-mebibyte-mib/>.
- [97] – Tech Report. *The SSD Endurance Experiment: They're all dead*. [online]. [cit. 27.1.2021]. <https://techreport.com/review/27909/the-ssd-endurance-experiment-theyre-all-dead/>.
- [98] – hblok. *Historical Cost of Computer Memory and Storage*. [online]. [cit. 27.1.2021]. <https://hblok.net/blog/storage/>.
- [99] – Heureka. [online]. [cit. 1.5.2020]. Dostupné z: <https://pevne-disky.heureka.cz/kingston-nv1-1000gb-snvs-1000g/>, <https://pevne-disky.heureka.cz/crucial-bx500-1tb-ct1000bx500ssd1/>, <https://pevne-disky.heureka.cz/samsung-970-evo-1tb-mz-v7e1t0bw/>, [https://pevne-disky.heureka.cz/wd-1tb-3\\_5-sataiii-5400rpm-wd10ezrz/](https://pevne-disky.heureka.cz/wd-1tb-3_5-sataiii-5400rpm-wd10ezrz/), [https://pevne-disky.heureka.cz/wd-1tb-3\\_5-sata3-6gbps-7200rpm-64mb-wd10ezex/](https://pevne-disky.heureka.cz/wd-1tb-3_5-sata3-6gbps-7200rpm-64mb-wd10ezex/), <https://pevne-disky.heureka.cz/samsung-870-1tb-mz-77e1t0b/>.

- [100] – Živě. *Velký test SSD s kapacitou 1 TB: rychlost se zvyšuje a SATA ztrácí smysl.* [online]. [cit. 27.4.2021]. <https://www.zive.cz/clanky/velky-test-ssd-skapacitou-1-tb-rychlost-se-zvysuje-a-sata-ztraci-smysl/sc-3-a-204576/default.aspx>.
- [101] – Statista. *Shipments of hard and solid state disk (HDD/SSD) drives worldwide from 2015 to 2021.* [online]. [cit. 1.5.2021]. <https://www.statista.com/statistics/285474/hdds-and-ssds-in-pcs-global-shipments-2012-2017/>.
- [102] – Techspot. *SSD shipments outpaced HDDs in 2020, but capacity still favors mechanical drives.* [online]. [cit. 3.5.2021]. <https://www.techspot.com/news/88645-ssd-shipments-outpaced-hdds-2020-but-capacity-favors.html>.
- [103] – DigitalRebellion. *Video Space Calculator.* [online]. [cit. 5.5.2021]. <https://www.digitalrebellion.com/webapps/videocalc>.
- [104] – Fórum Živě. *Kolik dat zapíšeme v průměru na SSD disk za měsíc?.* [online]. [cit. 5.5.2021]. <https://forum.zive.cz/viewtopic.php?f=940&t=1163708&st=0&sk=t&sd=a>.
- [105] – Seagate. *Data Sheet.* [online]. Dostupné z: [https://www.seagate.com/www-content/datasheets/pdfs/barracuda-q1-ssd-DS2033-2-2006US-en\\_US.pdf](https://www.seagate.com/www-content/datasheets/pdfs/barracuda-q1-ssd-DS2033-2-2006US-en_US.pdf).
- [106] – Kingston. *Datasheet.* [online]. Dostupné z: [https://www.kingston.com/datasheets/kc600\\_us.pdf](https://www.kingston.com/datasheets/kc600_us.pdf).
- [107] – Western Digital. *Product Brief: WD Blue SN550 NVMe SSD.* [online]. Dostupné z: [https://documents.westerndigital.com/content/dam/doc-library/cz\\_cz/assets/public/western-digital/product/internal-drives/wd-blue-nvme-ssd/product-brief-wd-blue-sn550-nvme-ssd.pdf](https://documents.westerndigital.com/content/dam/doc-library/cz_cz/assets/public/western-digital/product/internal-drives/wd-blue-nvme-ssd/product-brief-wd-blue-sn550-nvme-ssd.pdf).
- [108] – Patriot Viper. *VPN100 M.2 2280 PCIe SSD 512GB.* [online]. Dostupné z: [https://assets.website-files.com/5cdb2ee0b102f96c3906500f/5dd5bdbbcd567c0c585e4f57\\_Viper\\_VPN100\\_Product\\_Sheet\\_512GB.pdf](https://assets.website-files.com/5cdb2ee0b102f96c3906500f/5dd5bdbbcd567c0c585e4f57_Viper_VPN100_Product_Sheet_512GB.pdf).



# Příloha 1: Výstupní data z dlouhodobého zatěžování

Tyto přílohy umožňují ověření získaných a okomentovaných výsledků, hlavního zájmu měření, kterým bylo zjištění životnosti vybraných SSD disků.

## Seagate BarraCuda Q1

UD	Loop#	Timestamp	# files	ElapsedTimeInSeconds	MB written	TicksCreateFiles (ms)	Runtime (Hours)	TicksDeleteFiles (ms)	Random Write_MB	RandomWrite_Ticks (ms)	Compression	Deduplication
	1	1 23.01.2021 20:32	24120	857,007	73998,0098	857007	0,25027778	41091	100	1747	5	0
	2	2 23.01.2021 20:48	22800	807,352	69502,19727	807352	0,489606944	42433	100	1607	5	0
	3	3 23.01.2021 21:02	20840	668,433	63694,09961	668433	0,689320278	41059			5	0
	4	1 23.01.2021 21:16	21	0,312	64,56152344	312	0,000966389	499	100	1950	5	0
	5	2 23.01.2021 21:16	21	0,249	61,58105469	249	0,004511944	499	100	1794	5	0
	6	3 23.01.2021 21:16	21	0,249	53,89257813	249	0,008009444	499	100	1982	5	0
	7	4 23.01.2021 21:16	21	0,25	62,25097656	250	0,011561667	499	100	1435	5	0
	8	5 23.01.2021 21:16	21	0,265	64,24414063	265	0,014964167	515	100	1778	5	0
	9	6 23.01.2021 21:17	21	0,218	61,40625	218	0,018439167	515	100	2106	5	0
	10	7 23.01.2021 21:17	21	0,218	56,27929688	218	0,022005833	500	100	1591	5	0
	11	8 23.01.2021 21:17	21	0,28	52,95996094	280	0,025451944	500	100	1435	5	0
	12	9 23.01.2021 21:17	21	0,218	53,52246094	218	0,028839167	499	100	1513	5	0
	13	10 23.01.2021 21:17	21	0,25	58,04394531	250	0,032256944	499	100	1654	5	0
	14	11 23.01.2021 21:18	21	0,281	66,97070313	281	0,0357225	514	100	2262	5	0
	15	12 23.01.2021 21:18	21	0,25	57,24902344	250	0,039356667	499	100	1809	5	0
	16	13 23.01.2021 21:18	21	0,265	53,859375	265	0,042871944	499	100	1950	5	0
	17	1 23.01.2021 21:19	100000	6209,932	306443,5508	6209932	1,759186111	120230		2964	5	0
	18	2 23.01.2021 23:05	70180	3377,343	214822,2031	3377343	2,728223056	98468			5	0
	19	1 24.01.2021 10:15	480	6,068	1465,509766	6068	0,002709722	827			5	0
	20	1 24.01.2021 17:07	148420	10853,052	455216,6152	10853052	3,069882222	195781	100	2294	5	0
	21	2 24.01.2021 20:12	57060	2830,95	174810,1475	2830950	3,880342778	74381			5	0
	22	1 25.01.2021 9:35	80	0,905	223,1337891	905	0,001268056	811			5	0
	23	1 25.01.2021 9:35									5	0
	24	1 25.01.2021 15:49	75560	3906,936	230896,6367	3906936	1,111716389	92586			5	0
	25	1 25.01.2021 16:58	100001	6279,04	306296,2031	6279040	1,778858611	124832	100	2387	5	0
	26	2 25.01.2021 18:45	79400	4241,48	242953,4355	4241480	2,987620556	97657			5	0
	27	1 25.01.2021 19:59	10001	149,589	30435,22559	149589	0,044961111	12362	100	3603	5	0
	28	2 25.01.2021 20:02	10001	626,843	30514,18848	626843	0,226161945	11872	100	2091	5	0
	29	3 25.01.2021 20:13	4160	65,567	12729,50293	65567	0,249240833	5366			5	0
	30	1 25.01.2021 20:18	1001	13,869	3033,654207	13869	0,004313333	1623	100	1544	5	0
	31	2 25.01.2021 20:18	1001	29,936	3102,880859	29936	0,016296667	1622	100	2028	5	0
	32	1 25.01.2021 20:20	10001	119,154	30700,43652	119154	0,036494722	12199	81,91798875	5008	5	0
	33	2 25.01.2021 20:22	10001	123,49	30619,83984	123490	0,078397778	12324	95,109375	5007	5	0
	34	1 25.01.2021 20:25	20340	698,588	62178,68848	698588	0,2009425	24773			5	0
	35	1 25.01.2021 20:37	15001	355,214	45886,05762	355214	0,10374	18205	100	3198	5	0
	36	2 25.01.2021 20:44	15001	266,652	45885,60352	266652	0,186556389	18236	100	3120	5	0
	37	3 25.01.2021 20:49	15001	430,875	45876,41309	430875	0,315100278	18720	93,2265625	5008	5	0
	38	4 25.01.2021 20:56	15001	426,943	45978,68066	426943	0,442896389	18065	100	2449	5	0
	39	5 25.01.2021 21:04	15001	237,621	45814,70508	237621	0,517415278	18158	99,2109375	5398	5	0
	40	6 25.01.2021 21:09	15001	320,441	45726,44727	320441	0,615902778	18705	89,9140625	5007	5	0
	41	7 25.01.2021 21:14	15001	320,582	46130,0293	320582	0,714326111	18673	100	1888	5	0
	42	8 25.01.2021 21:20	15001	229,446	45571,04492	229446	0,786588111	18751	79,9375	5007	5	0
	43	9 25.01.2021 21:25	15001	233,877	45752,64941	233877	0,860871389	18517	80,23828125	5023	5	0
	44	10 25.01.2021 21:29	15001	309,038	45875,53809	309038	0,955824444	17737	100	5007	5	0
	45	11 25.01.2021 21:35	15001	212,489	45931,76074	212489	1,024078055	18175	0	5007	5	0
	46	12 25.01.2021 21:39	15001	255,358	45698,4707	255358	1,104304167	18424	0	5007	5	0
	47	13 25.01.2021 21:44	15001	244,048	46093,14746	244048	1,181053055	17222	0	5007	5	0
	48	14 25.01.2021 21:48	15001	197,887	46108,48242	197887	1,2452675	18252	0	5007	5	0
	49	15 25.01.2021 21:52	15001	214,439	46095,49414	214439	1,313852778	17441	0	5008	5	0
	50	16 25.01.2021 21:56	15001	241,645	46132,07617	241645	1,390418055	18970	0	5007	5	0
	51	17 25.01.2021 22:01	15001	197,123	45860,67285	197123	1,454565	18782	0	5008	5	0
	52	18 25.01.2021 22:05	15001	220,429	46024,34863	220429	1,525118889	18518	0	5008	5	0
	53	19 25.01.2021 22:09	15001	225,78	46134,94727	225780	1,597232222	18782	0	5008	5	0
	54	20 25.01.2021 22:13	15001	267,713	45768,38281	267713	1,680702778	17722	0	5008	5	0
	8951	8 04.05.2021 19:21	100000	6335,013	305699,8037	6335013	14,34385667	127812	100	2746	5	0
	8952	9 04.05.2021 21:09	86420	5065,696	263827,5713	5065696	15,78314278	102976			5	0
	8953	1 05.05.2021 6:57	100000	6296,793	306279,0557	6296793	1,784494167	124754	100	1451	5	0
	8954	2 05.05.2021 8:44	100000	6305,529	306046,292	6305529	3,57358389	123756	100	1669	5	0
	8955	3 05.05.2021 10:32	100000	6371,221	305804,5781	6371221	5,383511111	132835	100	1575	5	0
	8956	4 05.05.2021 12:20	100000	6324,858	305745,8916	6324858	7,179714722	129902	100	2480	5	0
	8957	5 05.05.2021 14:08	100000	6317,167	305696,6621	6317167	8,971979167	122507	100	1545	5	0
	8958	6 05.05.2021 15:56	100000	6331,659	305572,3857	6331659	10,76852778	124349	100	1622	5	0
	8959	7 05.05.2021 17:43	100000	6334,311	306023,8906	6334311	12,56564722	123693	100	1576	5	0
	8960	8 05.05.2021 19:31	100000	6320,177	306328,2275	6320177	14,35989778	127531	100	1467	5	0
	8961	9 05.05.2021 21:19	71680	3644,074	219992,1309	3644074	15,39985222	88250			5	0
	8962	1 06.05.2021 7:20	100000	6310,708	306215,0762	6310708	1,788721667	123506	100	1856	5	0
	8963	2 06.05.2021 9:07	100000	6312,643	306069,1221	6312643	3,580547778	126064	100	1326	5	0
	8964	3 06.05.2021 10:55	100000	6322,299	306345,7334	6322299	5,375679444	128841	100	1919	5	0
	8965	4 06.05.2021 12:42	100000	6364,451	305676,4434	6364451	7,181345278	124020	100	1466	5	0
	8966	5 06.05.2021 14:31	100000	6332,705	305278,3154	6332705	8,978822778	126735	100	1950	5	0
	8967	6 06.05.2021 16:18	100000	6305,233	306852,8789	6305233	10,7685225	125706	100	2137	5	0
	8968	7 06.05.2021 18:06	100000	6349,927	306675,0117	6349927	12,57428667	138685	76,1328125	5008	5	0
	8969	8 06.05.2021 19:54	100000	6342,782	305848,8984	6342782	14,37332806	118748	100	2324	5	0
	8970	9 06.05.2021 21:42	63860	2808,361	195069,0293	2808361	15,17940694	81199			5	0
	8971	1 07.05.2021 7:51	100000	6208,808	305803,7578	6208808	1,758830278	120324	100	1763	5	0
	8972	2 07.05.2021 9:37	100000	6326,449	306075,127	6326449	3,556551667	133568	100	1545	5	0
	8973	3 07.05.2021 11:25	100000	6299,305	306150,6475	6299305	5,345831944	130526	100	1467	5	0
	8974	4 07.05.2021 13:12	100000	6278,447	305553,1729	6278447	7,127692778	124770	100	1560	5	0
	8975	5 07.05.2021 14:59	100000	6333,937	305882,1182	6333937	8,925686389	127281	100	1497	5	0
	8976	6 07.05.2021 16:47	100000	6340,941	306551,0957	6340941	10,72157194	112758	100	1794	5	0
	8977	7 07.05.2021 18:35	100000	6285,795	306553,6973	6285795	12,50761972	132148	100	2387	5	0
	8978	8 07.05.2021 20:22	100000	6326,09	305992,8486	6326090	14,30172472	120292	100	2012	5	0
	8979	9 07.05.2021 22:09	60420	2495,626	184887,8584	2495626	15,02020472	78874			5	0
	8980	1 08.05.2021 8:22	100000	6324,655	306188,1426	6324655	1,79405278	131056	100	2636	5	0
	8981	2 08.05.2021 10:10	100000	6304,827	305865,9219	6304827	3,581963889	118998	100	1466	5	0
	8982	3 08.0										

# Kingston KC600

UID	Loop#	Tim estamp	# files	ElapsedTimeInSeconds	MB written	TicksCreateFiles (ms)	RunTime (Hours)	TicksDeleteFiles (ms)	Random Write_MB	Random Write_Ticks (ms)	Compression	Deduplication
1	1	23.01.2021 20:32	24120	857,007	73998,00098	857007	0,250277778	41091	100	1747	5	0
2	2	23.01.2021 20:48	22800	807,352	69502,19727	807352	0,489606944	42433	100	1607	5	0
3	3	23.01.2021 21:02	20840	668,433	63694,09961	668433	0,689302078	41059	100	1529	5	0
4	4	24.01.2021 10:16	10000	78,172	30402,71777	78172	0,0297075	11388	100	2028	5	0
5	5	24.01.2021 10:17	10000	84,381	30738,59668	84381	0,059681945	11466	100	1279	5	0
6	6	24.01.2021 10:19	10000	85,364	30525,14746	85364	0,089900833	12122	100	2481	5	0
7	7	24.01.2021 10:21	10000	96,175	30524,05469	96175	0,123768333	13198	100	1529	5	0
8	8	24.01.2021 10:23	10000	96,767	30854,8418	96767	0,157263056	12230	100	2917	5	0
9	9	24.01.2021 10:25	10000	94,505	30214,19238	94505	0,190526389	12293	100	1841	5	0
10	10	24.01.2021 10:27	10000	94,271	30526,50195	94271	0,223180833	11403	100	1653	5	0
11	11	24.01.2021 10:29	10000	120,323	30614,33496	120323	0,263258333	12262	100	1435	5	0
12	12	24.01.2021 10:31	10000	92,118	30477,53613	92118	0,295460833	12308	100	1201	5	0
13	13	24.01.2021 10:33	10000	92,649	30656,84668	92649	0,327646111	11997	100	2106	5	0
14	14	24.01.2021 10:35	10000	92,321	30605,32031	92321	0,360194444	12558	100	1076	5	0
15	15	24.01.2021 10:37	1740	16,021	5276,899414	16021	0,368318333	2294	100	5	0	
16	16	24.01.2021 10:38	100000	1242,08	305975,75	1242080	0,382806389	133412	100	1763	5	0
17	17	24.01.2021 11:01	100000	1283,061	305618,8086	1283061	0,781029722	138684	100	1419	5	0
18	18	24.01.2021 11:25	640	6,443	2036,522461	6443	0,786388889	1388	100	5	0	
19	19	24.01.2021 11:28	159020	2135,685	485717,5615	2135685	0,652983055	214985	100	1482	5	0
20	20	24.01.2021 12:07	120	1,232	389,4931641	1232	0,656803333	983	100	5	0	
21	21	25.01.2021 9:28									5	0
22	22	25.01.2021 15:54	158780	2044,066	485471,1074	2044066	0,628924444	217387	100	1887	5	0
23	23	25.01.2021 16:31	158820	2121,691	485484,3232	2121691	1,281266667	214829	100	1466	5	0
24	24	25.01.2021 17:11	158520	2021,227	485503,4961	2021227	1,904531667	211038	100	1997	5	0
25	25	25.01.2021 17:48	158280	1969,559	485475,8701	1969559	2,514936111	215906	100	2433	5	0
26	26	25.01.2021 18:25	158560	1972,399	485460,5986	1972399	3,125409722	212863	100	1326	5	0
27	27	25.01.2021 19:01	158680	2001,539	485444,293	2001539	3,745310556	218776	100	2278	5	0
28	28	25.01.2021 19:38	158540	2006,422	485474,5801	2006422	4,366206944	216498	100	1170	5	0
29	29	25.01.2021 20:16	158800	2115,654	485459,3076	2115654	5,019341111	224408	100	3151	5	0
30	30	25.01.2021 20:55	158640	2137,634	485503,8926	2137634	5,678663056	216217	100	1950	5	0
31	31	25.01.2021 21:34	158740	2072,957	485494,5352	2072957	6,315204444	213097	100	2574	5	0
32	32	25.01.2021 22:13	158480	2042,974	485476,6387	2042974	6,9463525	216560	100	1186	5	0
33	33	25.01.2021 22:50	113660	1309,55	347323,1045	1309550	7,356214167	154722	100	5	0	
34	34	26.01.2021 14:01	140240	1680,755	429721,4844	1680755	0,520370833	189915	100	1810	5	0
35	35	26.01.2021 14:33	140400	1687,228	429696,0059	1687228	1,045380556	191024	100	1092	5	0
36	36	26.01.2021 15:04	140380	1659,897	429727,5029	1659897	1,562504167	190618	100	1841	5	0
37	37	26.01.2021 15:35	140160	1653,408	429725,4619	1653408	2,076460833	184986	100	1763	5	0
38	38	26.01.2021 16:06	140720	1625,234	429705,0703	1625234	2,5852475	194611	100	1170	5	0
39	39	26.01.2021 16:37	140820	1639,492	429683,2637	1639492	3,094524722	182740	100	1778	5	0
40	40	26.01.2021 17:07	140420	1564,004	429688,6475	1564004	3,581795	178387	100	1217	5	0
41	41	26.01.2021 17:37	140360	1570,025	429694,4063	1570025	4,071769167	182646	100	1123	5	0
42	42	26.01.2021 18:06	140460	1661,099	429694,6338	1661099	4,588896389	189447	100	1435	5	0
43	43	26.01.2021 18:37	140440	1626,685	429720,3691	1626685	5,095823056	186811	100	1420	5	0
44	44	26.01.2021 19:07	140440	1626,076	429706,7607	1626076	5,601545556	183083	100	2886	5	0
45	45	26.01.2021 19:38	140720	1644,968	429692,5449	1644968	6,115343889	191803	100	3027	5	0
46	46	26.01.2021 20:09	140220	1776,788	429736,4707	1776788	6,665764722	191679	100	1825	5	0
47	47	26.01.2021 20:42	140180	1657,199	429719,9092	1657199	7,182670278	191818	100	1155	5	0
48	48	26.01.2021 21:13	140380	1650,053	429733,5469	1650053	7,696278889	187779	100	2262	5	0
49	49	26.01.2021 21:43	140480	1632,269	429712,0664	1632269	8,206011667	190477	100	2262	5	0
50	50	26.01.2021 22:14	140500	1637,48	429710,168	1637480	8,716614444	188434	100	1763	5	0
51	51	26.01.2021 22:45	140580	1625,998	429743,7295	1625998	9,2238575	188294	100	1232	5	0
52	52	26.01.2021 23:15	140120	1572,973	429725,8125	1572973	9,713169944	177420	100	1669	5	0
53	53	26.01.2021 23:44	140420	1569,448	429684,9502	1569448	10,24363	188044	100	2168	5	0
54	54	27.01.2021 01:14	12400	112,258	38000,54785	112258	10,24380889	16614	100	5	0	
2310	36	07.05.2021 20:34	100000	1171,146	306014,5713	1171146	13,09094694	136142	100	1888	5	0
2311	37	07.05.2021 20:56	100000	1172,581	306075,9824	1172581	13,455841944	138420	100	1123	5	0
2312	38	07.05.2021 21:18	100000	1168,65	305730,1826	1168650	13,823326111	133880	100	2418	5	0
2313	39	07.05.2021 21:40	100000	1171,77	307150,3477	1171770	14,19091917	139137	100	1701	5	0
2314	40	07.05.2021 22:02	100000	1151,974	305762,2725	1151974	14,5522275	137187	100	1669	5	0
2315	41	07.05.2021 22:24	100000	1150,804	306327,9229	1150804	14,91235889	133833	100	2324	5	0
2316	42	07.05.2021 22:46	23420	236,31	72089,40137	236310	14,99029667	31934	100	5	0	
2317	1	08.05.2021 8:22	100000	1164,844	306631,1924	1164844	0,363012222	136282	100	2356	5	0
2318	2	08.05.2021 8:44	100000	1162,161	306075,6182	1162161	0,727220833	136595	100	1794	5	0
2319	3	08.05.2021 9:06	100000	1166,326	306493,1875	1166326	1,0917675	134239	100	2464	5	0
2320	4	08.05.2021 9:28	100000	1165,577	306293,8691	1165577	1,456832222	136189	100	1357	5	0
2321	5	08.05.2021 9:50	100000	1162,769	305597,1582	1162769	1,820744444	135939	100	2324	5	0
2322	6	08.05.2021 10:12	100000	1162,051	306324,8457	1162051	2,184949444	136766	100	2496	5	0
2323	7	08.05.2021 10:33	100000	1165,874	306546,1211	1165874	2,550469167	137499	100	1435	5	0
2324	8	08.05.2021 10:55	100000	1163,596	306523,2959	1163596	2,914749722	136376	100	1685	5	0
2325	9	08.05.2021 11:17	100000	1164,001	306279,3574	1164001	3,279951944	139012	100	2294	5	0
2326	10	08.05.2021 11:39	100000	1164,313	306944,1992	1164313	3,645876389	140713	100	2075	5	0
2327	11	08.05.2021 12:01	100000	1171,77	306565,5293	1171770	4,012038889	134332	100	1529	5	0
2328	12	08.05.2021 12:23	100000	1172,691	305529,6348	1172691	4,378909722	136485	100	1934	5	0
2329	13	08.05.2021 12:45	100000	1173,159	306055,9805	1173159	4,746791111	139293	100	1607	5	0
2330	14	08.05.2021 13:07	100000	1134,111	306009,5391	1134111	5,002972222	126892	100	1965	5	0
2331	15	08.05.2021 13:28	100000	1093,489	305779,8389	1093489	5,443357778	129574	100	2605	5	0
2332	16	08.05.2021 13:49	100000	1090,977	305688,2119	1090977	5,786511667	131775	100	1981	5	0
2333	17	08.05.2021 14:10	100000	1103,457	305756,584	1103457	6,133548889	133881	100	1294	5	0
2334	18	08.05.2021 14:30	100000	1123,285	305616,3955	1123285	6,484027778	127141	100	1373	5	0
2335	19	08.05.2021 14:51	100000	1096,796	306280,5596	1096796	6,828094722	130463	100	1420	5	0
2336	20	08.05.2021 15:12	100000	1144,61	306318,6982	1144610	7,186830833	135425	100	1606	5	0
2337	21	08.05.2021 15:34	100000	1142,707	305945,8555	1142707	7,544778611	134302	100	2012	5	0
2338	22	08.05.2021 15:55	100000	1147,808	306377,7881	1147808	7,904794167	136236	100	1404	5	0
2339	23	08.05.2021 16:17	100000	1146,841	306024,7266	1146841	8,262874167	130838				

# WD SN550

UID	Loop#	Tim estamp	# files	ElapsedTim	eInSeconds	MB written	TicksCreateFiles (ms)	Runtime (Hours)	TicksDeleteFiles (ms)	Random Write_MB	Random Write_Ticks	Compression	Deduplication
1		123.01.2021 20:32	24120		857,007	73998,00098	857007	0,250277778	41091	100	1747	5	0
2		223.01.2021 20:48	22800		807,352	69502,19727	807352	0,489606944	42433	100	1607	5	0
3		323.01.2021 21:02	20840		668,433	63694,09961	668433	0,689930278	41099	100		5	0
4		124.01.2021 12:10	154760		2018,996	474238,3135	2018996	0,614323333	191413	100	437	5	0
5		224.01.2021 12:47	155001		1917,158	474005,1758	1917158	1,207179444	206686	100	1170	5	0
6		324.01.2021 13:23	1380		6,131	4221,5-9805	6131	1,212591111	2153	100		5	0
7		124.01.2021 21:02	154640		2108,385	474246,2549	2108385	0,641713889	200617	100	406	5	0
8		224.01.2021 21:41	154760		1938,234	474250,3984	1938234	1,2372725	195345	100	436	5	0
9		324.01.2021 22:16	154860		1865,834	474248,207	1865834	1,8127275	195376	100	421	5	0
10		424.01.2021 22:51	154840		1892,292	474246,4004	1892292	2,396664722	199463	100	718	5	0
11		524.01.2021 23:26										5	0
12		125.01.2021 9:29	1060		223,721		223721	0,079995556	63180			5	0
13		125.01.2021 9:34										5	0
14		125.01.2021 15:07	12100		159,371	36507,77539	159371	0,050255	20436			5	0
15		125.01.2021 15:46	154620		1971,681	474112,3721	1971681	0,605858611	208324	100	421	5	0
16		225.01.2021 16:23	154860		2085,702	474085,373	2085702	1,246165833	208933	100	437	5	0
17		325.01.2021 17:01	154960		2010,697	474117,5479	2010697	1,863477778	201147	100	702	5	0
18		425.01.2021 17:38	154960		1948,639	474124,0137	1948639	2,464305	203628	100	858	5	0
19		525.01.2021 18:14	154840		1942,181	474115,1563	1942181	3,062928889	202006	100	827	5	0
20		625.01.2021 18:50	154740		1966,642	474081,0752	1966642	3,669231667	205219	100	858	5	0
21		725.01.2021 19:26	155001		1989,637	473611,6182	1989637	4,282034722	205578	100	686	5	0
22		825.01.2021 20:03	154980		2113,47	474104,4863	2113470	4,930257222	209416	100	967	5	0
23		925.01.2021 20:42	154660		2135,373	474111,9443	2135373	5,583734167	206139	100	500	5	0
24		1025.01.2021 21:21	154600		2078,198	474127,1494	2078198	6,220471111	203519	100	920	5	0
25		1125.01.2021 22:00	154580		2039,448	474114,915	2039448	6,845908889	201179	100	452	5	0
26		1225.01.2021 22:37	154660		1973,35	474089,8604	1973350	7,453072222	201990	100	5	5	0
27		125.01.2021 13:53	154960		1995,424	474117,6396	1995424	0,611678611	205547	100	437	5	0
28		226.01.2021 14:30	154400		1992,304	474116,9492	1992304	1,224460556	203254	100	827	5	0
29		326.01.2021 15:07	154800		1988,654	474098,3857	1988654	1,836969444	205515	100	577	5	0
30		426.01.2021 15:43	154760		1978,857	474094,248	1978857	2,4464475	205407	100	717	5	0
31		526.01.2021 16:20	154760		1946,986	474096,0332	1946986	3,046499167	201772	100	561	5	0
32		626.01.2021 16:56	154780		1904,819	474089,1055	1904819	3,633271667	196998	100	546	5	0
33		726.01.2021 17:31	155001		1866,567	474032,0391	1866567	4,210654167	201460	100	468	5	0
34		826.01.2021 18:06	154780		2003,942	474125,04	2003942	4,826101667	200898	100	999	5	0
35		926.01.2021 18:43	154560		1954,676	474125,875	1954676	5,429109444	205438	100	827	5	0
36		1026.01.2021 19:19	154820		1953,647	474119,4141	1953647	6,030729722	201350	100	842	5	0
37		1126.01.2021 19:55	25980		319,194	79793,08398	319194	6,131351667	32198	100	5	5	0
38		126.01.2021 21:18	136640		1755,589	418375,3545	1755589	0,537822778	179432	100	406	5	0
39		226.01.2021 21:50	136600		1723,858	418341,4844	1723858	1,068992222	177919	100	983	5	0
40		326.01.2021 22:22	136780		1739,614	418336,2803	1739614	1,604108611	175813	100	452	5	0
41		426.01.2021 22:54	136540		1707,961	418332,418	1707961	2,129874722	174347	100	421	5	0
42		526.01.2021 23:26	136960		1645,982	418340,0186	1645982	2,637645	171570	100	437	5	0
43		626.01.2021 23:56	94580		1163,486	289297,041	1163486	2,999353611	128201	100		5	0
44		127.01.2021 10:39	136001		1732,376	417234,9482	1732376	0,528813333	170306	100	421	5	0
45		227.01.2021 11:11	136001		1640,163	417052,5703	1640163	1,035278056	172693	100	421	5	0
46		327.01.2021 11:42	136001		1636,326	416117,5137	1636326	1,540335278	171461	100	546	5	0
47		427.01.2021 12:12	136001		1638,775	416621,7305	1638775	2,045904722	170712	100	530	5	0
48		527.01.2021 12:42	136001		1636,793	415981,6162	1636793	2,551266111	171976	100	561	5	0
49		627.01.2021 13:13	136001		1635	416469,8818	1635000	3,055697778	170384	100	437	5	0
50		727.01.2021 13:43	136001		1638,026	416550,752	1638026	3,561428611	172178	100	421	5	0
51		827.01.2021 14:13	136001		1664,484	415565,3359	1664484	4,074408611	171819	100	671	5	0
52		927.01.2021 14:44	136001		1680,833	416497,6553	1680833	4,593755555	178106	100	499	5	0
53		1027.01.2021 15:15	136001		1778,037	417063,2344	1778037	5,140487222	179666	100	608	5	0
54		1127.01.2021 15:48	136001		1756,306	416860,5117	1756306	5,680660278	177701	100	530	5	0
2420		3707.05.2021 22:08	100000		1292,983	306990,4287	1292983	14,67343028	129278	100	1217	5	0
2421		3807.05.2021 22:32	85200		1076,157	260717,4512	1076157	15,00724694	114333	100	5	5	0
2422		108.05.2021 8:23	100000		1294,403	305326,0605	1294403	0,395469445	128233	100	717	5	0
2423		208.05.2021 8:46	100000		1299,956	305777,874	1299956	0,795447778	129247	100	531	5	0
2424		308.05.2021 9:10	100000		1299,675	306063,208	1299675	1,195185	128842	100	561	5	0
2425		408.05.2021 9:34	100000		1299,738	305779,4482	1299738	1,595163611	129621	100	718	5	0
2426		508.05.2021 9:58	100000		1297,289	306493,7256	1297289	1,994338889	129012	100	578	5	0
2427		608.05.2021 10:22	100000		1296,321	306609,4424	1296321	2,39329	129310	100	873	5	0
2428		708.05.2021 10:46	100000		1297,772	306052,4189	1297772	2,793171667	130916	100	624	5	0
2429		808.05.2021 11:10	100000		1295,962	306604,2207	1295962	3,191951667	129013	100	468	5	0
2430		908.05.2021 11:34	100000		1297,335	306177,333	1297335	3,591091667	128841	100	624	5	0
2431		1008.05.2021 11:58	100000		1289,676	305509,7617	1289676	3,987893056	128451	100	749	5	0
2432		1108.05.2021 12:22	100000		1292,281	304941,5674	1292281	4,3858275	129527	100	546	5	0
2433		1208.05.2021 12:46	100000		1295,682	306450,0352	1295682	4,784811944	130120	100	562	5	0
2434		1308.05.2021 13:10	100000		1244,388	306739,96	1244388	5,168619444	126751	100	562	5	0
2435		1408.05.2021 13:33	100000		1214,889	305713,9082	1214889	5,544010556	125955	100	593	5	0
2436		1508.05.2021 13:55	100000		1206,293	305652,4092	1206293	5,917024167	125955	100	578	5	0
2437		1608.05.2021 14:18	100000		1251,05	305881,3174	1251050	6,303288611	128903	100	999	5	0
2438		1708.05.2021 14:41	100000		1217,634	306468,3789	1217634	6,679444444	125534	100	499	5	0
2439		1808.05.2021 15:04	100000		1237,993	306732,5566	1237993	7,062057778	128919	100	452	5	0
2440		1908.05.2021 15:26	100000		1262,267	305400,4219	1262267	7,451221389	128264	100	468	5	0
2441		2008.05.2021 15:50	100000		1265,106	306526,3643	1265106	7,841286667	128654	100	452	5	0
2442		2108.05.2021 16:13	100000		1263,108	305864,7363	1263108	8,230652222	128155	100	453	5	0
2443		2208.05.2021 16:37	100000		1268,834	306394,1641	1268834	8,621736667	128576	100	749	5	0
2444		2308.05.2021 17:00	100000		1261,689	305909,3174	1261689	9,010830556	128841	100	468	5	0
2445		2408.05.2021 17:23	100000		1262,001	305782,2061	1262001	9,400748333	130682	100	468	5	0
2446		2508.05.2021 17:47	100000		1267,929	306441,8389	1267929	9,791465278	128186	100	468	5	0
2447		2608.05.2021 18:10	100000		1264,887	305501,6426	1264887	10,18137417	128311	100	452	5	0
2448		2708.05.2021 18:34	100000		1266,073	306145,751	1266073	10,57179222	128966	100			

# Patriot Viper VPN100

UID	Loop#	Tim estamp	# files	ElapsedTimeInSeconds	MB written	TicksCreateFiles (ms)	RunTime (Hours)	TicksDeleteFiles (ms)	Random Write_MB	Random Write_Ticks (ms)	Compression	Deduplication
1		1 23.01.2021 20:32	24120	857,007	73998,00098	857007	0,250277778	41091	100	1747	5	0
2		2 23.01.2021 20:48	22800	807,352	69502,19727	807352	0,489606944	42433	100	1607	5	0
3		3 23.01.2021 21:02	20840	668,433	63694,09961	668433	0,689930278	41059			5	0
4		4 1 25.01.2021 15:10	140140	1940,263	429087,9639	1940263	0,618043611	282253	100	375	5	0
5		5 2 25.01.2021 15:48	148860	1997,421	455559,0947	1997421	1,256635556	289834	100	405	5	0
6		6 3 25.01.2021 16:26	148700	2114,282	455551,4365	2114282	1,9321125	307025	100	405	5	0
7		7 4 25.01.2021 17:06	148680	2047,81	455569,457	2047810	2,584330556	289756	100	421	5	0
8		8 5 25.01.2021 17:45	148960	1976,033	455548,7373	1976033	3,216563611	289585	100	421	5	0
9		9 6 25.01.2021 18:23	148800	1974,816	455558,4668	1974816	3,846284167	281754	100	405	5	0
10		10 7 25.01.2021 19:01	149140	1997,983	455557,5527	1997983	4,486744444	292725	100	1014	5	0
11		11 8 25.01.2021 19:40	148560	2030,54	455557,665	2030540	5,127529722	265217	100	406	5	0
12		12 9 25.01.2021 20:18	148800	2154,514	455556,6572	2154514	5,810763889	294686	100	686	5	0
13		13 10 25.01.2021 20:59	148880	2159,475	455534,3262	2159475	6,497262222	301191	100	608	5	0
14		14 11 25.01.2021 21:40	148700	2057,949	455525,0762	2057949	7,153394722	293484	100	811	5	0
15		15 12 25.01.2021 22:20	149000	2054,112	455575,6904	2054112	7,808069722	291862	100	858	5	0
16		16 13 25.01.2021 22:59	79380	803,779	242837,1953	803779	8,072802222	138358			5	0
17		17 1 26.01.2021 13:54	148800	2026,515	455555,7607	2026515	0,6422225	286527	100	390	5	0
18		18 2 26.01.2021 14:33	148840	2027,982	455546,0244	2027982	1,293331944	302018	100	546	5	0
19		19 3 26.01.2021 15:12	148660	2016,765	455592,2617	2016765	1,939421389	298602	100	390	5	0
20		20 4 26.01.2021 15:51	148560	2004,909	455583,0771	2004909	2,579959444	290615	100	1014	5	0
21		21 5 26.01.2021 16:29	148880	1979,824	455589,2637	1979824	3,213559167	290115	100	468	5	0
22		22 6 26.01.2021 17:07	3460	14,882	10590,59082	14882	3,221833611	4415			5	0
23		23 1 26.01.2021 18:25	148880	1992,772	455556,0566	1992772	0,633606111	288197	100	889	5	0
24		24 2 26.01.2021 19:03	148760	1980,775	455565,0117	1980775	1,267585	290661	100	671	5	0
25		25 3 26.01.2021 19:41	149000	2021,742	455551,3555	2021742	1,9152075	299007	100	452	5	0
26		26 4 26.01.2021 20:20	148880	2166,386	455591,6143	2166386	2,601316389	293141	100	687	5	0
27		27 5 26.01.2021 21:01	148880	2047,762	455576,0166	2047762	3,255633056	297089	100	405	5	0
28		28 6 26.01.2021 21:40	148860	1995,549	455596,917	1995549	3,891956667	284795	100	889	5	0
29		29 7 26.01.2021 22:19	148920	1995,206	455568,4268	1995206	4,530531667	292783	100	686	5	0
30		30 8 26.01.2021 22:57	148680	1978,592	455569,0859	1978592	5,157695833	268493	100	453	5	0
31		31 9 26.01.2021 23:35	148780	1938,109	455556,5283	1938109	5,778855556	287604			5	0
32		32 1 27.01.2021 10:40	130660	1795,883	399790,3496	1795883	0,563395556	230476	100	406	5	0
33		33 2 27.01.2021 11:14	130660	1632,129	399812,5537	1632129	1,085329167	235717	100	406	5	0
34		34 3 27.01.2021 11:46	130460	1624,313	399795,4023	1624313	1,605272222	237043	100	421	5	0
35		35 4 27.01.2021 12:17	130860	1690,739	399800,9443	1690739	2,146381667	246824	100	406	5	0
36		36 5 27.01.2021 12:49	130860	1702,766	399837,5566	1702766	2,6855325	227746	100	421	5	0
37		37 6 27.01.2021 13:22	130600	1681,051	399780,6025	1681051	3,222986111	243330	100	500	5	0
38		38 7 27.01.2021 13:54	130640	1679,741	399823,5908	1679741	3,764516667	259227	100	531	5	0
39		39 8 27.01.2021 14:26	130820	1632,535	399791,5459	1632535	4,290692778	251146	100	717	5	0
40		40 9 27.01.2021 14:58	130740	1727,508	399779,668	1727508	4,846529444	262784	100	530	5	0
41		41 10 27.01.2021 15:31	130400	1747,008	399829,8398	1747008	5,406848333	259601	100	718	5	0
42		42 11 27.01.2021 16:05	130360	1715,589	399786,0225	1715589	5,956126667	251100	100	561	5	0
43		43 12 27.01.2021 16:38	130640	1685,201	399782,6475	1685201	6,497176945	252019	100	687	5	0
44		44 13 27.01.2021 17:10	130900	1634,906	399800,5654	1634906	7,020364167	237855	100	421	5	0
45		45 14 27.01.2021 17:42	130860	1649,757	399810,9395	1649757	7,547542778	237667	100	453	5	0
46		46 15 27.01.2021 18:13	130720	1685,622	399777,4131	1685622	8,085235	239617	100	406	5	0
47		47 16 27.01.2021 18:46	130600	1631,302	399781,7041	1631302	8,611103889	251412	100	1014	5	0
48		48 17 27.01.2021 19:17	130380	1639,352	399823,6318	1639352	9,142743056	263501	100	983	5	0
49		49 18 27.01.2021 19:49	130420	1678,352	399773,8682	1678352	9,682598333	254126	100	983	5	0
50		50 19 27.01.2021 20:21	130640	1712,485	399812,0195	1712485	10,23233028	255530	100	437	5	0
51		51 20 27.01.2021 20:54	130840	1667,916	399790,2686	1667916	10,767816167	247105	100	655	5	0
52		52 21 27.01.2021 21:26	130680	1599,509	399782,9414	1599509	11,28647111	259274	100	905	5	0
53		53 22 27.01.2021 21:58	130620	1625,14	399777,2598	1625140	11,81333667	260678	100	436	5	0
54		54 23 27.01.2021 22:29	130720	1579,12	399826,8711	1579120	12,32666694	258432	100	390	5	0

2530	13	08.05.2021 12:40	100000	1104,892	305639,5742	1104892	4,646760278	166719	100	873	5	0
2531	14	08.05.2021 13:02	100000	1090,229	305921,502	1090229	4,999135833	167451	100	530	5	0
2532	15	08.05.2021 13:23	100000	1040,605	306742,0801	1040605	5,335108056	158372	100	515	5	0
2533	16	08.05.2021 13:43	100000	1038,608	306000,6309	1038608	5,670307778	157577	100	764	5	0
2534	17	08.05.2021 14:03	100000	1033,381	306245,1836	1033381	6,005134444	161227	100	468	5	0
2535	18	08.05.2021 14:23	100000	1067,109	305813,1758	1067109	6,352544167	173099	100	593	5	0
2536	19	08.05.2021 14:44	100000	1036,969	306760,3809	1036969	6,686777778	155674	100	702	5	0
2537	20	08.05.2021 15:04	100000	1058,841	306069,624	1058841	7,0318775	172803	100	406	5	0
2538	21	08.05.2021 15:25	100000	1086,843	305891,333	1086843	7,385591667	176094	100	468	5	0
2539	22	08.05.2021 15:46	100000	1091,009	306177,333	1091009	7,741243055	178870	100	468	5	0
2540	23	08.05.2021 16:08	100000	1091,009	306603,083	1091009	8,095316944	173177	100	421	5	0
2541	24	08.05.2021 16:29	100000	1087,92	306374,832	1087920	8,450333333	179760	100	468	5	0
2542	25	08.05.2021 16:50	100000	1086,641	305589,2666	1086641	8,803524722	174284	100	437	5	0
2543	26	08.05.2021 17:11	100000	1084,129	305630,375	1084129	9,156338611	175548	100	453	5	0
2544	27	08.05.2021 17:32	100000	1089,667	306909,4189	1089667	9,5097225	172038	100	702	5	0
2545	28	08.05.2021 17:54	100000	1092,802	306579,1807	1092802	9,863341667	169526	100	453	5	0
2546	29	08.05.2021 18:15	100000	1089,542	306160,0869	1089542	10,21719083	173863	100	437	5	0
2547	30	08.05.2021 18:36	100000	1089,261	305852,375	1089261	10,57029639	171461	100	702	5	0
2548	31	08.05.2021 18:57	100000	1082,709	305745,8916	1082709	10,92110222	169495	100	406	5	0
2549	32	08.05.2021 19:18	100000	1086,531	305954,9775	1086531	11,27568806	179557	100	437	5	0
2550	33	08.05.2021 19:40	100000	1085,626	306119,1348	1085626	11,62667194	167483	100	1030	5	0
2551	34	08.05.2021 20:01	100000	1104,378	305934,457	1104378	11,98527056	175532	100	515	5	0
2552	35	08.05.2021 20:22	100000	1101,663	305610,6299	1101663	12,34188694	171632	100	687	5	0
2553	36	08.05.2021 20:44	100000	1100,992	306013,916	1100992	12,69933139	175127	100	468	5	0
2554	37	08.05.2021 21:05	100000	1103,816	305984,5059	1103816	13,05889111	180134	100	733	5	0
2555	38	08.05.2021 21:27	100000	1081,789	306271,7725	1081789	13,411365	176375	100	827	5	0
2556	39	08.05.2021 21:48	100000	1076,547	306002,9023	1076547	13,76036667	169027	100	983	5	0
2557	40	08.05.2021 22:09	100000	1085,782	306362,7334	1085782	14,11127472	166500	100	406		