Operační systémy 2

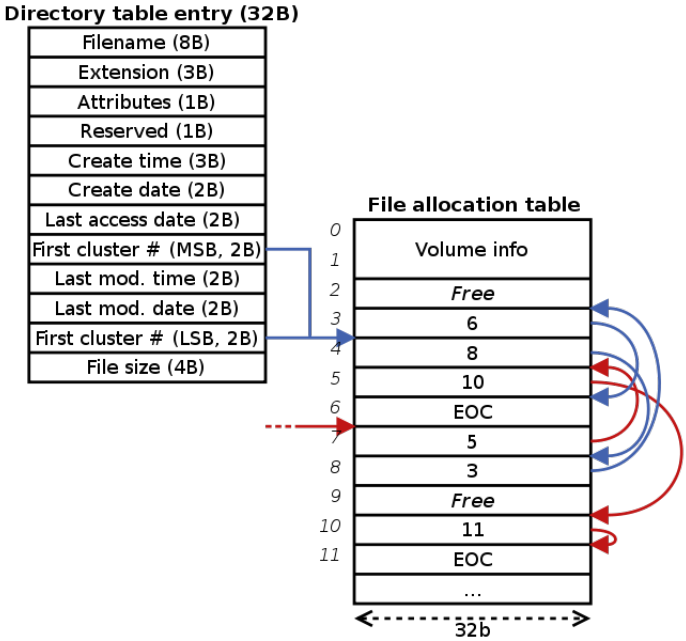
Implementace souborových systémů

Petr Krajča

Katedra informatiky
Univerzita Palackého v Olomouci

FAT

- souborový systém pro MSDOS (přežil se až do Windows ME, dodnes ve spotřební elektronice)
- jednoduchý design
- soubory se jmény ve tvaru 8.3, nepodporuje oprávnění
- nemá metody proti poškození dat
- disk rozdělený na bloky (clustery)
- soubory popsány pomocí File Allocation Table (FAT) – spojový seznam
- disk rozdělen na úseky:
  - bootsector (rezervovaná oblast) + informace o svazku
  - 2× FAT
  - kořenový adresář
  - data
- adresáře jako soubory; kořenový adresář je vytvořen společně s FS
- původní FAT nepodporoval adresáře


Directory table entry (32B)
Filename (8B)
Extension (3B)
Attributes (1B)
Reserved (1B)
Create time (3B)
Create date (2B)
Last access date (2B)
First cluster # (MSB, 2B)
Last mod. time (2B)
Last mod. date (2B)
First cluster # (LSB, 2B)
File size (4B)
File allocation table
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
Volume info
Free
6
8
10
EOC
5
3
Free
11
EOC
...
32b

FAT: varianty

- FAT12, 16, 32; (max. kapacity – 32 MB, 2 GB, 8 TB); záleží na velikosti clusteru
- další omezení na velikost souboru

Virtual FAT

- podpora dlouhých jmen (LFN)
- až 256 znaků
- soubor má dvě jména – dlouhé a ve tvaru 8.3
- dlouhá jména uložena jako další záznamy v adresáři

exFAT

- určen pro flash paměti
- podpora větších disků (512 TB/64 ZB)
- podpora v novějších Windows (původně Windows CE 6)
- zatížen patenty

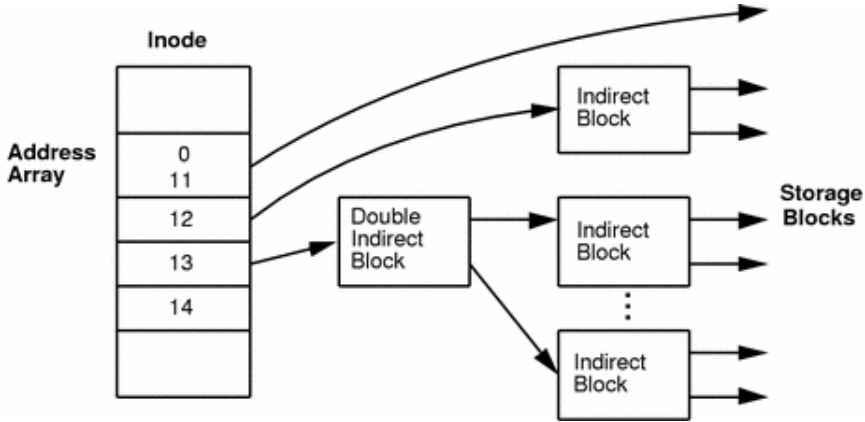
UFS: Unix File System (1/2)

- v různých variantách přítomný v unixových OS – *BSD, Solaris, System V
- disk se skládá:
  - bootblock – místo pro zavaděč OS
  - superblock – informace o souborovém systému
  - bitmapy pro inody a data
  - místo pro inody
  - místo pro data

I-node

- struktura popisující soubor
- informace o souboru
  - typ souboru, vlastníka (UID, GID), oprávnění (rwx)
  - časy (vytvoření, přístup)
  - počet ukazatelů, počet otevřených popisovačů
- informace o uložení dat
  - patnáct ukazatelů na bloky na disku
  - bloky 0 až 11 ukazují na bloky dat
  - blok 12 – nepřímý blok 1. úrovně
  - blok 13 – nepřímý blok 2. úrovně
  - blok 14 – nepřímý blok 3. úrovně

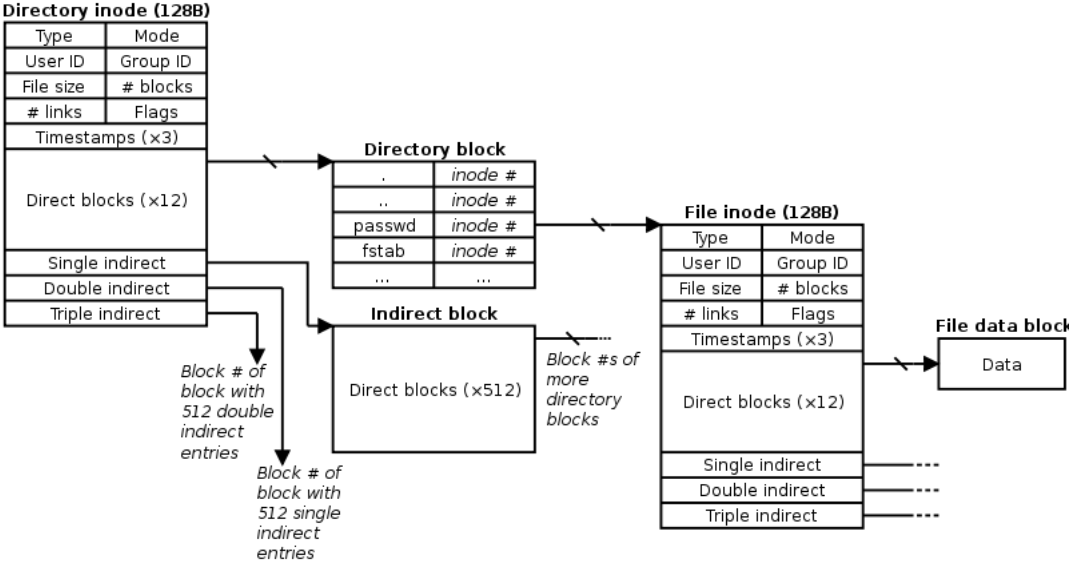
Inode


Inode
Address Array
0
11
12
13
14
Double Indirect Block
Indirect Block
Indirect Block
Indirect Block
Storage Blocks

UFS: Unix File System (2/2)

- adresář je soubor obsahující sekvenci dvojic (jméno souboru, číslo inode)
- struktura inode umožňuje mít *řídké soubory*
- velikost bloku $\Longrightarrow$ rychlejší přístup k větším souborům vs. nevyužité místo
- možnost rozdělit blok na několik fragmentů
- k evidenci volného místa a inode se používají bitmapy
- svazek může být rozdělený na několik tzv. skupin – každá mající vlástní inody, bitmapy, atd. + kopie superblocku $\Longrightarrow$ sloučení souvisejících dat $\Longrightarrow$ eliminace přesunů hlavičky
- konkrétní detaily se mohou lišit
- např. FreeBSD přidává možnost dělat snapshoty

Inode


Directory inode (128B)
Type
Mode
User ID
Group ID
File size
blocks
links
Flags
Timestamps (×3)
Direct blocks (×12)
Single indirect
Double indirect
Triple indirect
Directory block
.
inode #
..
inode #
passwd
inode #
fstab
inode #
...
...
Indirect block
Direct blocks (×512)
Block #s of more directory blocks
Block # of block with 512 double indirect entries
Block # of block with 512 single indirect entries
File inode (128B)
Type
Mode
User ID
Group ID
File size
blocks
links
Flags
Timestamps (×3)
Direct blocks (×12)
Single indirect
Double indirect
Triple indirect
File data block
Data

FS v Linuxu

- Linux nemá jeden hlavní FS
- nejčastěji se používá: ext4 (nejkonzervativnější volba)
- název souboru může mít až 256 znaků (s výjimkou znaků / a \0)
- vychází z UFS
- ext2: maximální velikost souboru 16 GB–2 TB, disku: 2 TB – 16 TB
- ext3: přidává žurnál (3 úrovně – journal, ordered, unordered), binárně kompatibilní s ext2
- ext4: přidává vylepšení
  - maximální velikost souboru 16 TB, disku: 1 EB
  - podpora extentů (místo mapování jednotlivcýh bloků je možné alokovat i souvislou oblast až do velikosti 128 MB)
  - optimalizace alokací
  - lepší práce s časem
- další FS: BtrFS, JFS, XFS, ...

NTFS: Úvod

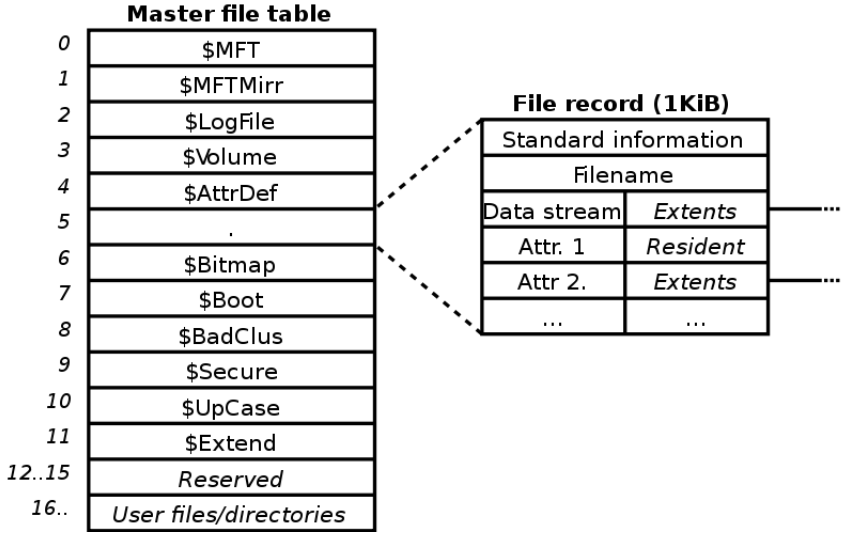
- hlavní souborový systém Windows NT
- kořeny v OS/2 a jeho HPFS (vyvíjen od roku 1993)
- velikost clusteru podle velikosti svazku (512 B–4 kB) $\Longrightarrow$ max. velikost disku 256 TB
  max. velikost souboru 16 TB
- oproti FAT (souborovému systému W9x) ochrana před poškozením + práva
- žurnálování a transakce
- podpora více streamů v jednom souboru
- dlouhé názvy (255 znaků) + unicode
- podpora standardu POSIX; hardlinky, symlinky
- komprese a řídké soubory

Adresáře

- opět technicky soubory; jména v B+ stromech
- některá metadata souborů jsou součástí adresáře

NTFS: Struktura disku (1/2)

- na začátku disku: boot sector
- 12 % MFT (Master File Table); 88 % data souborů
- MFT je soubor popisující všechny soubory na FS (MFT je taky soubor)
- MFT se skládá ze záznamů o velikosti 1 kB
- každý soubor je popsán tímto záznamem
- 32 prvních souborů má speciální určení ($MFT, $MFTMirr, $LogFile, $Volume, $Bitmap, $Boot, $BadClus, ...)
- informace o souborech včetně jména, časů, atd. uloženy jako záznam v MFT jako dvojice *atribut-hodnota*
- tělo souboru je taky atribut $\Longrightarrow$ uniformní přístup; možnost uložit malé soubory přímo do MFT
- alternativní proudy $\Longrightarrow$ opět atributy
- v případě potřeby může jeden soubor zabrat víc záznamů v MFT
- případně lze použít místo mimo MFT (rezidentní a nerezidentní atributy)


Master file table
0
$MFT
1
$MFTMirr
2
$LogFile
3
$Volume
4
$AttrDef
5
.
6
$Bitmap
7
$Boot
8
$BadClus
9
$Secure
10
$UpCase
11
$Extend
12..15
Reserved
16..
User files/directories
File record (1KiB)
Standard information
Filename
Data stream
Extents
Attr. 1
Resident
Attr 2.
Extents
...
...
...
...

NTFS: Struktura disku (2/2)

- data v souboru jsou popsána pomocí (atributu) tabulky mapující VCN (virtual cluster number) na LCN (logical cluster number)
- VCN – číslo clusteru v souboru (indexováno od nuly)
- LCN – číslo clusteru ve svazku
- každý záznam v tabulce je ve tvaru: VCN, LCN, počet clusterů, např.

VCN	LCN	počet
0	123	4
4	42	8
32	456	15

Komprese

- řídké soubory
- možnost transparentně komprimovat obsah (vždy po 16 clusterech) $\Longrightarrow$ bloky dat zarovnány na 16 clusterů; pokud zabírá míň místa, je komprimován
- čtení i zápis provádí (de)kompresi (LZ77) $\Longrightarrow$ dopad na výkon

B-stromy

- vyvážené stromy
  - všechny listy jsou ve stejné hloubce
  - každý uzel (mimo kořenového) obsahuje nejméně $t-1$ klíčů, tj. má t potomků; v neprázdném stromě kořen obsahuje alespoň jeden klíč
  - každý uzel má nanejvýš $2t-1$ klíčů $\Longrightarrow$ $2t$ potomků $\Longrightarrow$ plný uzel
  - **Věta:** Pokud je počet klíčů $n \geq 1$, pak pro B-strom stupně $t \geq 2$ a výšky h platí

$$h \leq \log_t \frac{n+1}{2}.$$

- ne všechna data v paměti (vs. běžné binarní stromy)
- rozdílné přístupové doby primarní paměti a sekundární (desítky až stovky nanosekund vs. milisekundy–vystavení hlavičky)
- preferované sekvenční čtení $\Longrightarrow$ načtení celých stránek
- zobecnění 2,3-stromů, 2,3,4-stromů
- rozlišujeme složitost operací (porovnání, atd.) a I/O operací (zápisy, čtení)
- složitost vyhledávání, vložení: $O(th) = O(t \log_t n)$
- počet přístupů na disk: $O(h) = O(\log_t n)$

Souborové systémy využívající B-stromy

XFS

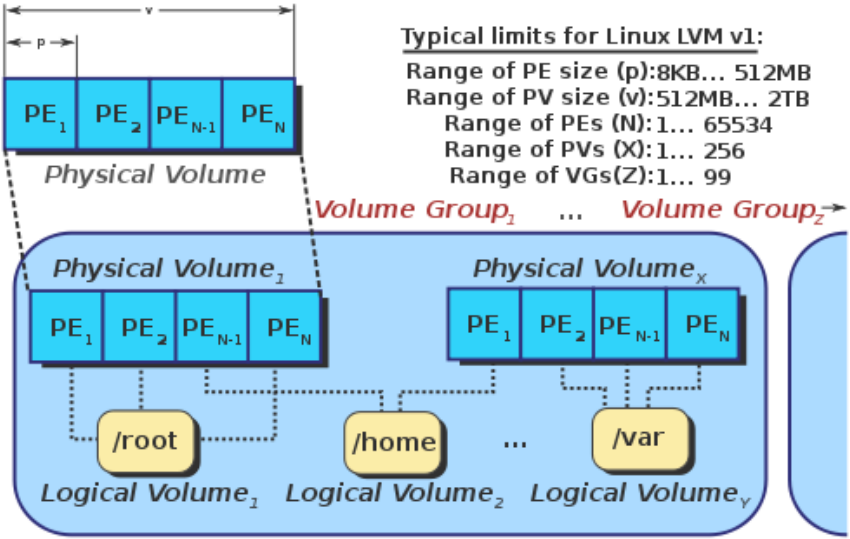
- navržen SGI pro operační systém IRIX (k dispozici i v Linuxu)
- spoléhá na B+stromy (nutné zaplnění ze 2/3)
- rozdělení disku na agregační jednotky
- evidence volného místa v B-stromech (dva stromy $\Longrightarrow$ vyhledávání podle pozice, velikosti)
- uložení souborů $\Longrightarrow$ extenty jako v případě NTFS (uloženo v inodách)
- u větších souborů použití B-stromů $\Longrightarrow$ zřetězení listů
- malé adresáře v inodách; větší $\Longrightarrow$ B-stromy

JFS

- navržen IBM pro AIX
- koncepce žurnálování blízká databázovým systémům
- v některých ohledech podobný přístup jako u XFS

LVM: Logical Volume Management

- problém: disky a oddíly mají pevnou velikost (rozdělení disku je pevně dané)
- řešení: logical volume management—vrstva mezi blokovým zařízením a FS
- fyzické disky (PV: physical volumes) rozdělen na rozasahy (PE: physical extents)
- jednotlivé PE poskytnuty do společné Volume Group
- odtud jsou pak přidělovány jednotlivým logickým svazkům $\Longrightarrow$ možnost dynamicky měnit velikost svazku $\Longrightarrow$ nutná podpora FS
- možnost emulovat RAID
- možnost vložit vrstvu, která se bude starat o snapshoty/klony (CoW)
- možnost transparentně provádět šifrování
- ve Windows implementace podobná: Logical Disk Manager & Volume Snapshot Service (umožňují SW RAID); spolupráce s FS
- někdy dodáván jako software třetích stran

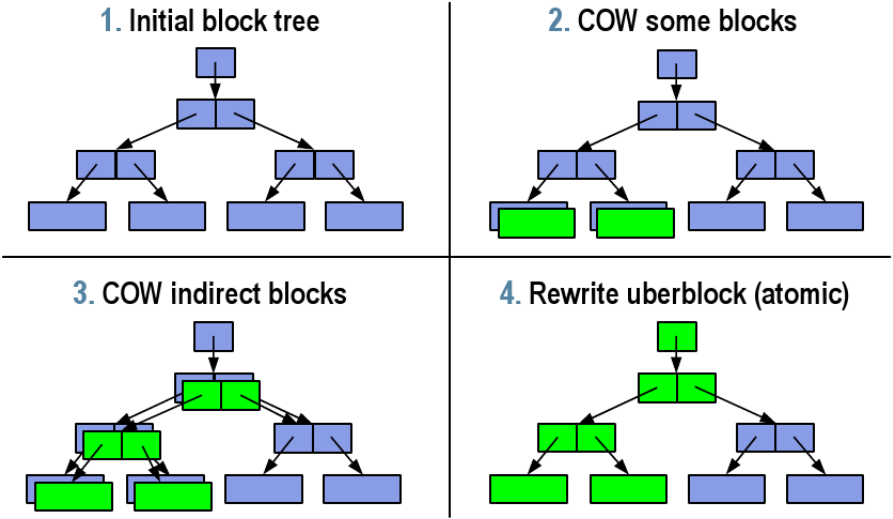

v
p
PE1
PE2
PEN-1
PEN
Physical Volume
Typical limits for Linux LVM v1:
Range of PE size (p):8KB... 512MB
Range of PV size (v):512MB... 2TB
Range of PEs (N):1... 65534
Range of PVs (X):1... 256
Range of VGs(Z):1... 99
Volume Group1
...
VolumeGroupZ
Physical Volume1
Physical VolumeX
/root
/home
/var
Logical Volume1
Logical Volume2
Logical VolumeY

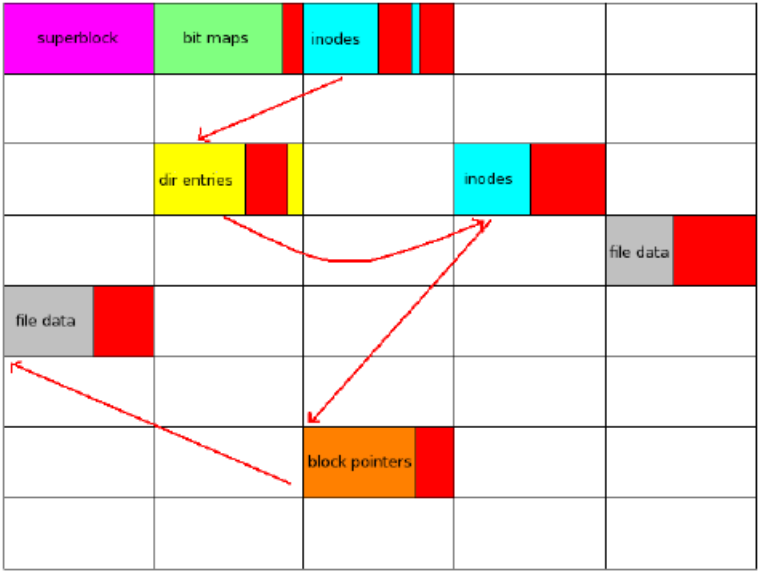
ZFS (1/2)

- moderní souborový systém (r. 2005); SUN (Oracle)
- podpora (open)Solaris, FreeBSD, NetBSD, OS X?, Linux (licenční problémy)
- kombinuje prvky LVM, RAID
- interně 128 bitová adresace (max. kapacita 256 ZB, ostatní limity kolem 16 EB)
- disky jsou spojeny do *poolu*, FS dělá automatický stripping $\Longrightarrow$ rozprostře se přes všechny disky
- bloky dat různých velikostí
- little- a big-endian (podle aktuální situace)
- ditto blocks (zdvojené zápisy)
- deduplikace
- podpora komprese

ZFS: Konzistence (2/2)

- RAID-Z: podobný RAID-5, ale má různě velké bloky (odpovídají logickým blokům) $\Longrightarrow$ např. 3 bloky dat + 1 paritní, atd.
- u dat jsou evidovány kontrolní součty $\Longrightarrow$ ochrana proti tichému poškození (chyba HW i SW)
- konzistence založena na metodě Copy-on-Write
- používaná data nikdy nejsou přepsána $\Longrightarrow$ nejdřív jsou zapsána data a pak jsou (atomicky) změněna metadata
- $\Longrightarrow$ výhodné slučovat operace do transakcí
- $\Longrightarrow$ FS je vždy v konzistentním stavu
- $\Longrightarrow$ infrastruktura pro vytváření snapshotů/klonů souborového systému


1. Initial block tree
2. COW some blocks
3. COW indirect blocks
4. Rewrite uberblock (atomic)


superblock
bit maps
inodes
dir entries
inodes
file data
file data
block pointers

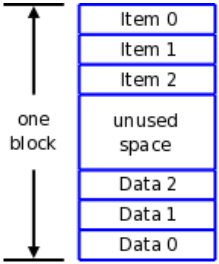
BtrFS (1/2)

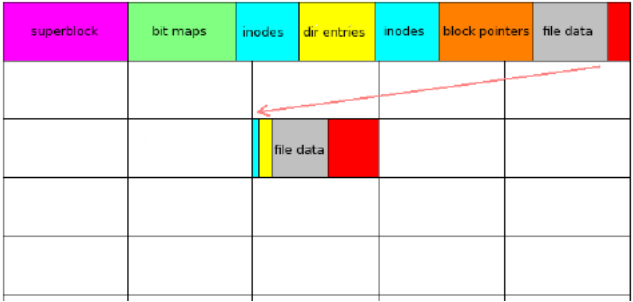
- všechna data uložena v B-stromech
- varianta podporující CoW (řeší integritu)
- jedna implementace (jednoduchá implementace, kontrolní součty, atd.)
- všechny klíče ve tvaru:

```
struct btrfs_disk_key {
  __le64 objectid;
  u8 type;
  __le64 offset;
}
```

- slučování souvisejících dat vedle sebe
- malé soubory ve stromu
- velké soubory (vlastní extenty), popsané v klíči (využití offsetu)
- automatická defregmentace
- několik speciálních stromů (volné místo)

BtrFS (2/2)


Item 0
Item 1
Item 2
one block
unused space
Data 2
Data 1
Data 0


superblock
bit maps
inodes
dir entries
inodes
block pointers
file data
file data

ISO-9660

- souborový systém pro CD-ROM; podpora všech OS
- zápis jen jednou; sekvenční čtení $\Longrightarrow$ není potřeba dělat kompromisy
- logický sektor 2048 B (může být i větší)
- na disku může být víc logických svazků; svazek může být na více discích
- na začátku 16 rezervovaných bloků + 1 blok (Primary Volume Descriptor) $\Longrightarrow$ informace o disku; odkaz na kořenový adresář
- adresář popsán pomocí záznamů proměnlivé délky (viz Tan. 432)
  - textová data v ASCII
  - binární 2× (little- i big-endian)
- možnosti formátu určeny úrovněmi a rozšířeními
- **Level 1** – soubory 8.3; všechny soubory spojité; 8 úrovní adresářů
- **Level 2** – jména až 31 znaků
- **Level 3** – nespojité soubory (jednotlivé souvislé bloky se mohou opakovat)
- *Rock Ridge* – kompatibilita s unixy (jména, oprávnění, odkazy, speciální soubory)
- *Joliet* – kompatibilita s Windows

UDF: Universal Disk Format

- náhrada za ISO-9660
- používán převážně pro DVD a Blue-ray disky
- dlouhé názvy, soubory až 1EB
- různé varianty formátu:
  - **Plain build** – základní formát (data lze přepisovat, pokud to médium podporuje; přepis konkrétních sektorů – DVD-RAM, DVD+RW)
  - **Virtual Allocation Table** – inkrementální zápisy (CD-R)
  - **Spare build** – pokud to médium podporuje, lze data přepisovat; zahrnuta obrana proti opotřebení sektorů