ZFS met RAID-Z als alternatief voor klassieke RAID-oplossingen

Jonas De Moor

Toegepaste Informatica - Systeem- en Netwerkbeheer
Hogeschool Gent

jonas.demoor.v3741@student.hogent.be

16 juni 2017

Inhoud

Motivatie voor het voeren van dit onderzoek

- RAID5 'write hole'
- Relatie tussen BTRFS en ZFS
- ZFS On Linux (cf. Ubuntu 16.04 LTS)
- Interesses: Linux en Unix

Onderzoeksvragen

- Wat zijn de grootste verschillen tussen een klassieke RAID-oplossing en ZFS RAID-Z?
- Hoe is de architectuur van ZFS opgebouwd en op welke manieren tracht het oplossingen te vinden voor de problemen die zich voordoen bij andere bestandssystemen en RAID-opstellingen?
- Hoe staat het met data-integriteit en performantie[1] bij ZFS onder verschillende workloads en toepassingen?

[1] Met 'performantie' wordt het aantal I/O's per seconde en de globale CPU-belasting bedoeld.

Opbouw van het onderzoek

Twee grote onderdelen:

1. Theoretisch gedeelte
   - Inleiding tot RAID-niveaus
   - Architectuur en ontwerpprincipes van ZFS
   - Interne datastructuren en transactiemodel
2. Praktisch gedeelte
   - Storage Pools & VDEV's
   - Datasets
   - Performantie & Betrouwbaarheid

Gehanteerde methodiek

- Phoronix Benchmark: performantietesten op fysieke machine
  - FIO (Flexible I/O Tester): IOPS
  - FS-Mark: bestandssysteemoperaties
  - PostMark: simulatie van webserver/mailserver
  - SQLite: databankoperaties
- Virtuele Machine: betrouwbaarheidstesten
  - Wegvallen van een schijf (array van drie schijven)
  - Dataverlies door gebruikersfout
  - Bescherming tegen datacorruptie

Gehanteerde methodiek

Specificaties	
Fabrikant	HP
Model	HP Pavilion Elite HPE-310be
CPU	Intel Core i5 650 @ 3.2 GHz (2 Cores; 4 Threads)
Geheugen	10GB DDR3 @ 1333MHz
GPU	AMD Radeon HD 5570
Interne schijven	SAMSUNG HD103SJ (1TB) WDC WD1002FAEX-0 (1TB) WDC WD5000AZRX-0 (500GB)
Externe schijf	WD Elements 1078 (1TB)
RAID Controller	Intel Corporation SATA RAID Controller

Tabel: Specificaties van het fysieke systeem dat gebruikt werd doorheen de bachelorproef (data verkregen via `lshw`)

Gehanteerde methodiek

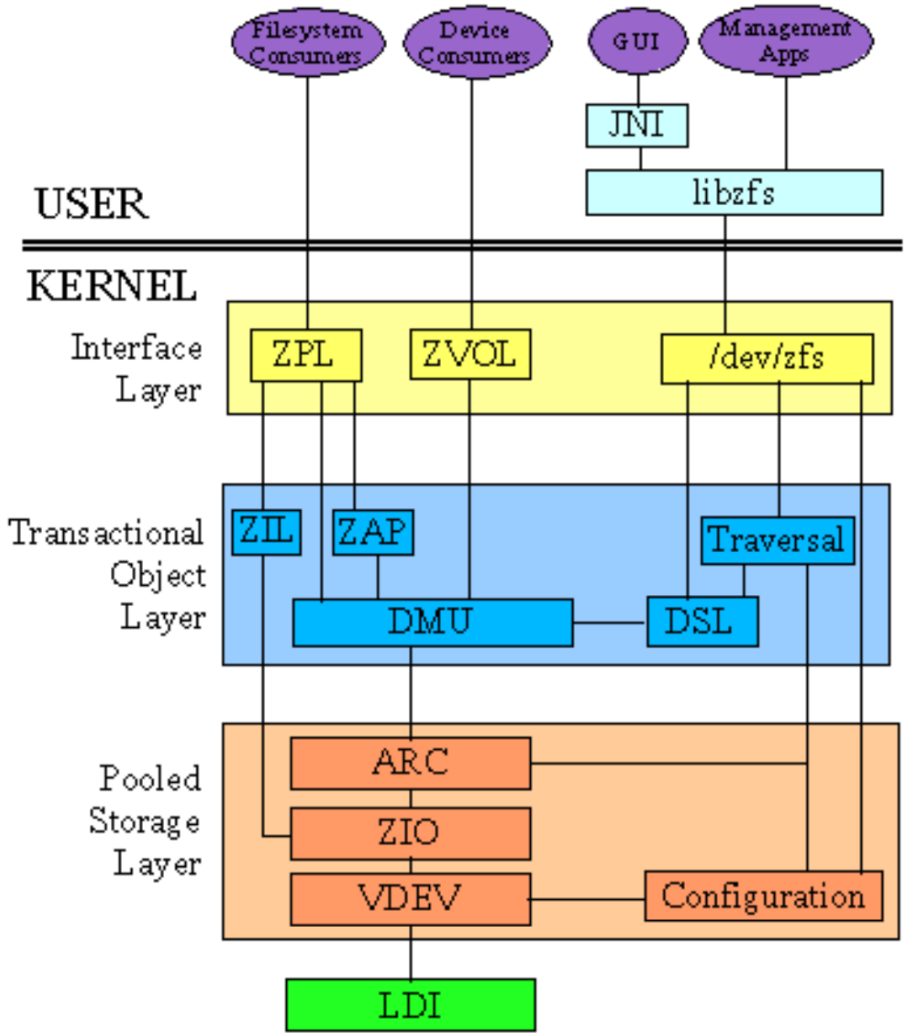
Specificaties Virtuele Machine	
OS	Fedora Server 25
CPU	4x Host CPU (Intel Core i7-4712HQ CPU @ 2.30GHz)
Geheugen	8GB
OS-schijf	20GB (`/dev/sda`; SATA non-hot-pluggable)
Zpool schijven	40GB (`/dev/sdb`; SATA hot-pluggable) 40GB (`/dev/sdc`; SATA hot-pluggable) 40GB (`/dev/sdd`; SATA hot-pluggable)
NIC's	VirtualBox NAT-adapter (10.0.2.15/24) VirtualBox Host-only Adapter (192.168.56.10/24)

Tabel: Specificaties van de virtuele machine die gebruikt werd voor de betrouwbaarheidstesten

ZFS: een kort overzicht

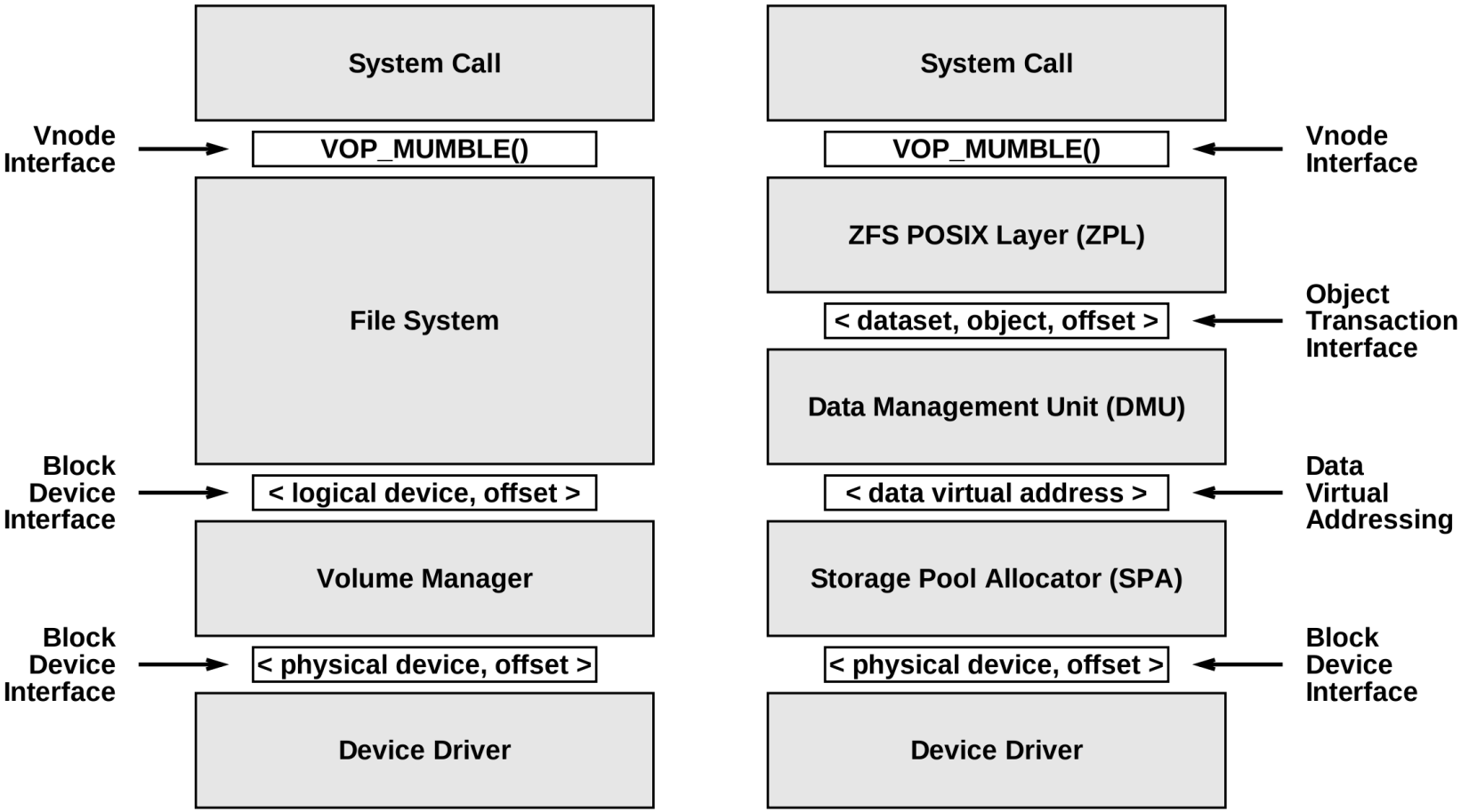
- Copy-On-Write bestandssysteem
- Ontwikkeld door Sun Microsystems (begin jaren 2000)
- Oorspronkelijk onderdeel van Solaris
- Nu: verdere ontwikkeling via OpenZFS (en Oracle)
- Ondertussen ook beschikbaar op BSD en Linux (ZFS on Linux)
- Beschikt over RAID-Z (softwarematige RAID)

Architectuur van ZFS



Figuur: Een overzicht van de verschillende componenten van ZFS (Kendi, Onbekend)

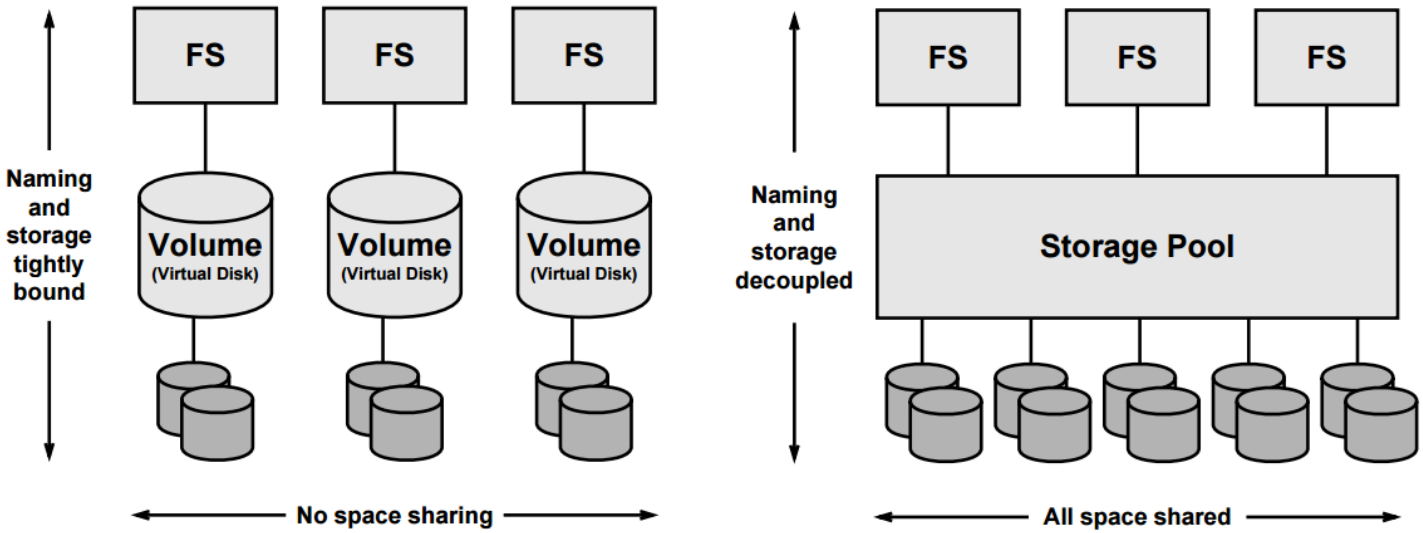
Architectuur van ZFS



Figuur: Vergelijking tussen een 'traditionele' storage stack (links) en de ZFS storage stack (rechts) (Bonwick e.a., 2002)

Storage Pools

- Abstractie voor fysieke apparaten → gegroepeerd in VDEV's
- Dynamische allocatie van opslagruimte
- Schijven kunnen worden toegevoegd zonder downtime[2]

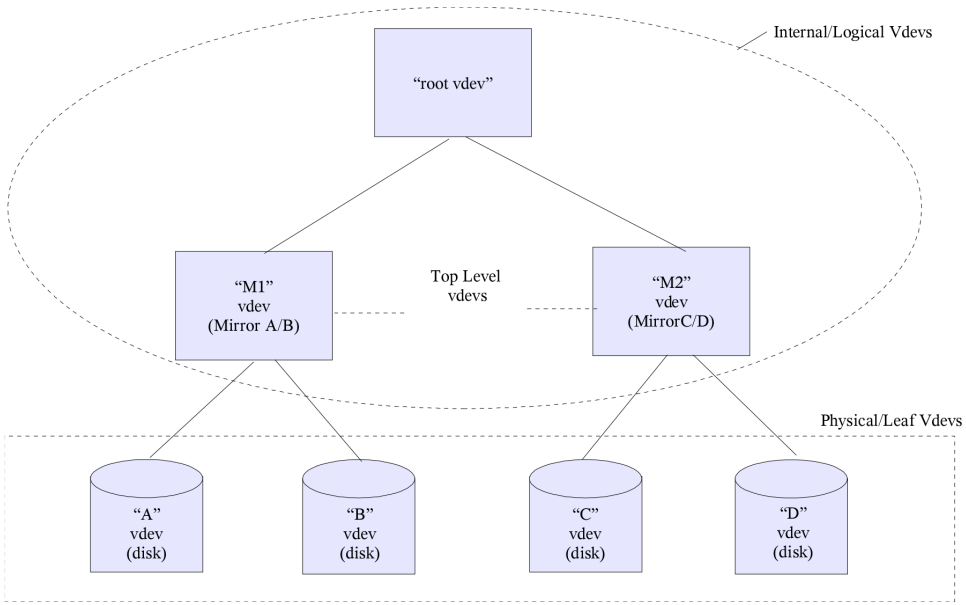


Figuur: Illustratie van ZFS pooled storage (rechts) t.o.v.volume-based storage (links) (Bonwick e.a., 2002)

[2] Afhankelijk van de situatie

VDEV's: Virtual Devices

- Bouwstenen van storage pools
- RAID-niveaus binnen ZFS:
  - Stripes, Mirrors, RAID-Z, etc.
- Speciale VDEV's:
  - SLOG, L2ARC



Figuur: Conceptuele voorstelling van VDEV's in een boomstructuur (Sun Microsystems, 2006)

Voorbeeld: zpool met een RAID-Z VDEV

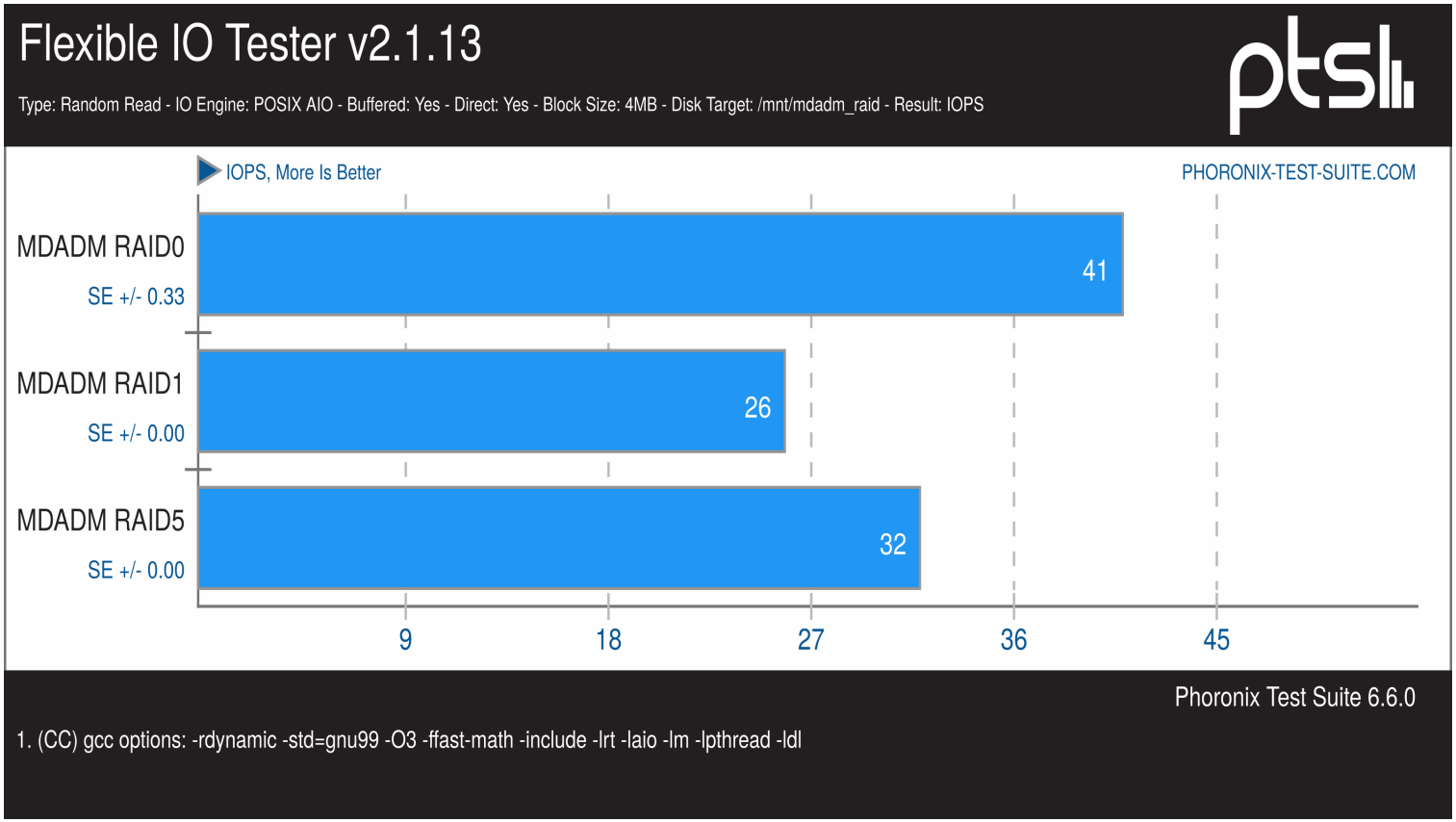
```
$ zpool create storage raidz1 /dev/sda /dev/sdb /dev/sdc
$ zpool status
  pool: storage
  state: ONLINE
  scan: none requested
  config:

NAME         STATE     READ WRITE CKSUM
storage      ONLINE       0     0     0
  raidz1-0   ONLINE       0     0     0
    sda      ONLINE       0     0     0
    sdb      ONLINE       0     0     0
    sdc      ONLINE       0     0     0

  errors: No known data errors
```

Benchmarks

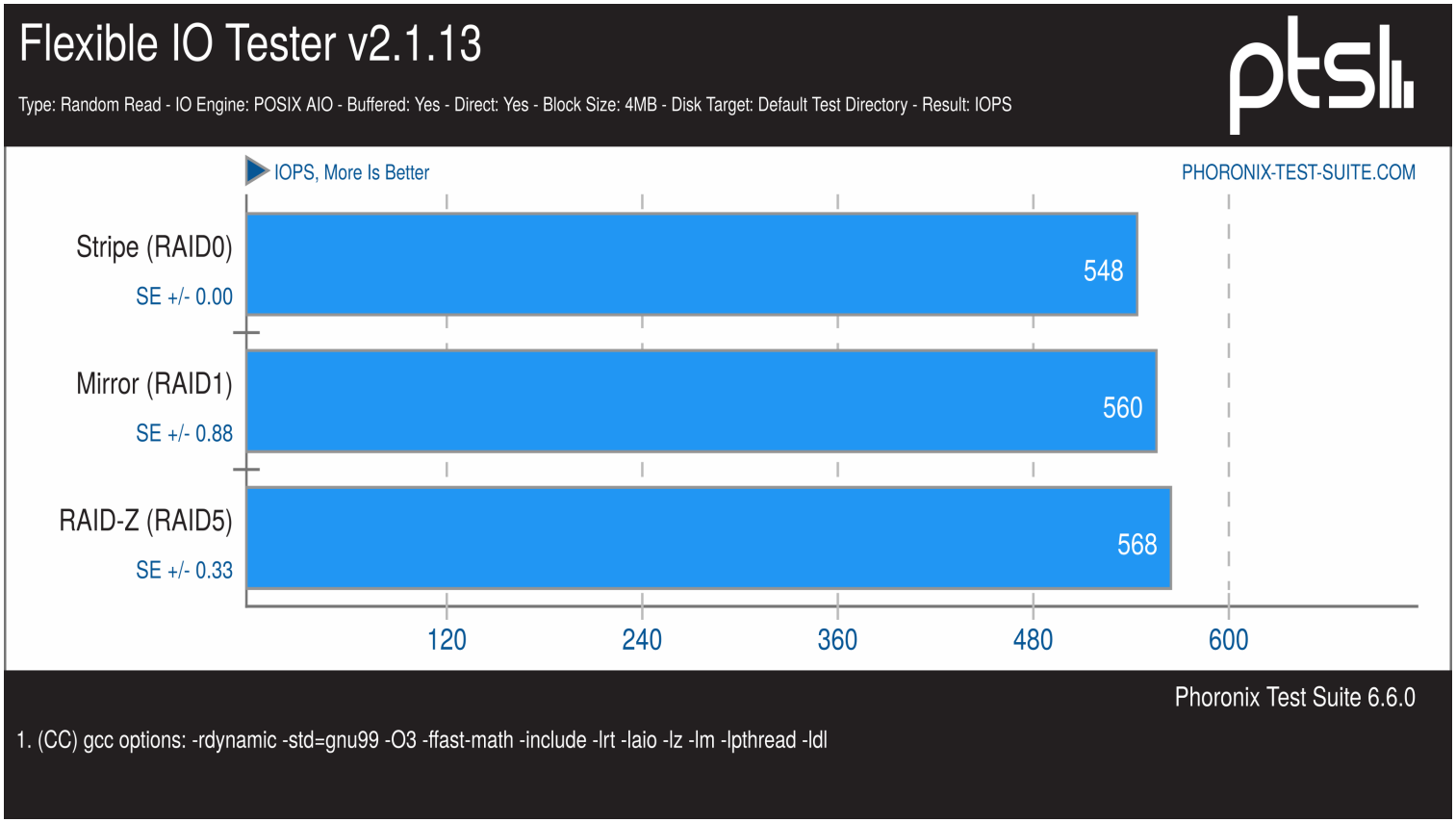
FIO-benchmark: aantal IOPS (Invoer/Uitvoer-bewerkingen per seconde)



Figuur: Aantal IOPS bij random read operaties (blokgrootte: 4MB), uitgevoerd op een Linux MD-opstelling

Benchmarks

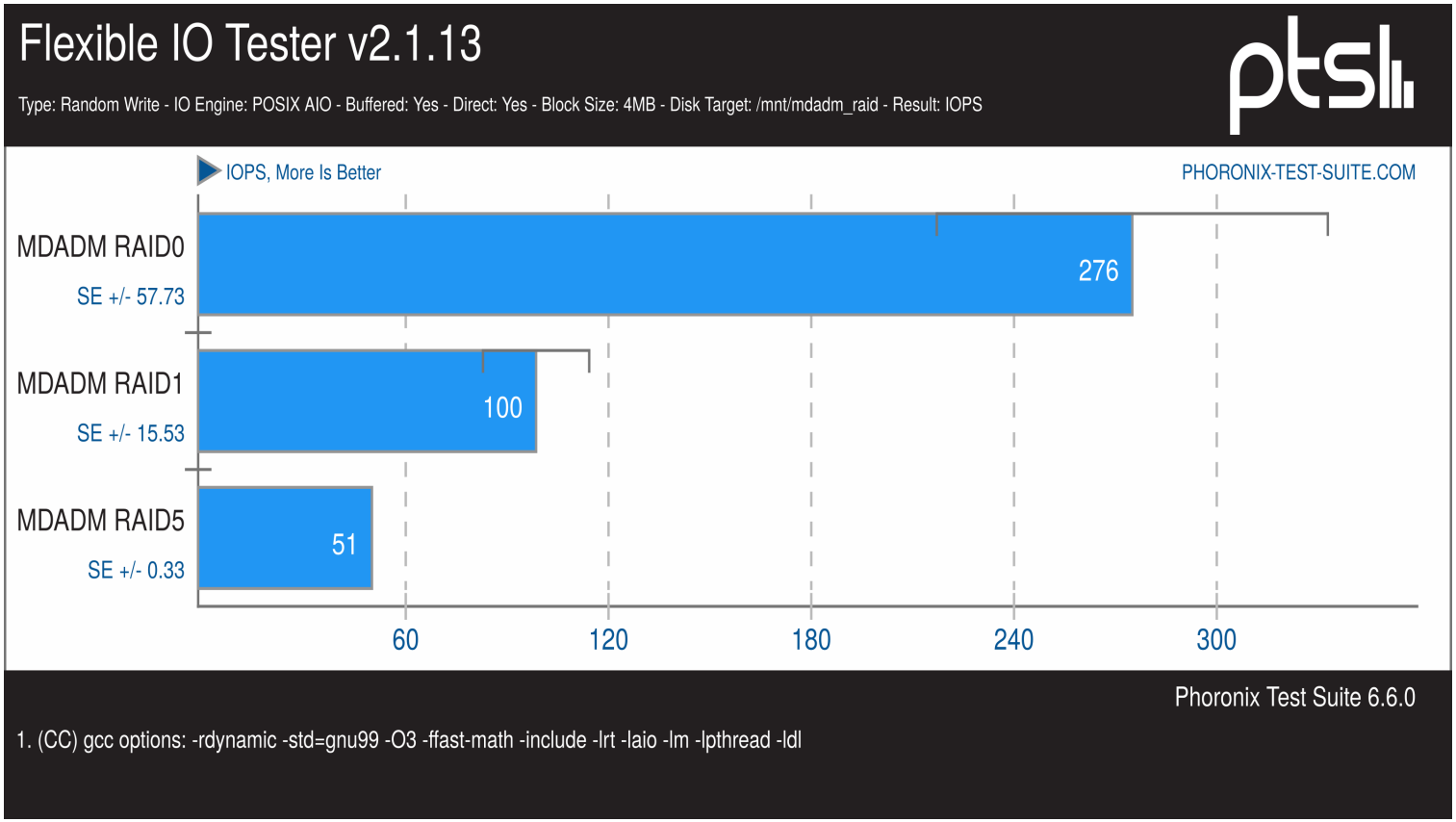
FIO-benchmark: aantal IOPS (Invoer/Uitvoer-bewerkingen per seconde)



Figuur: Aantal IOPS bij random read operaties (blokgrootte: 4MB), uitgevoerd op een ZFS-opstelling

Benchmarks

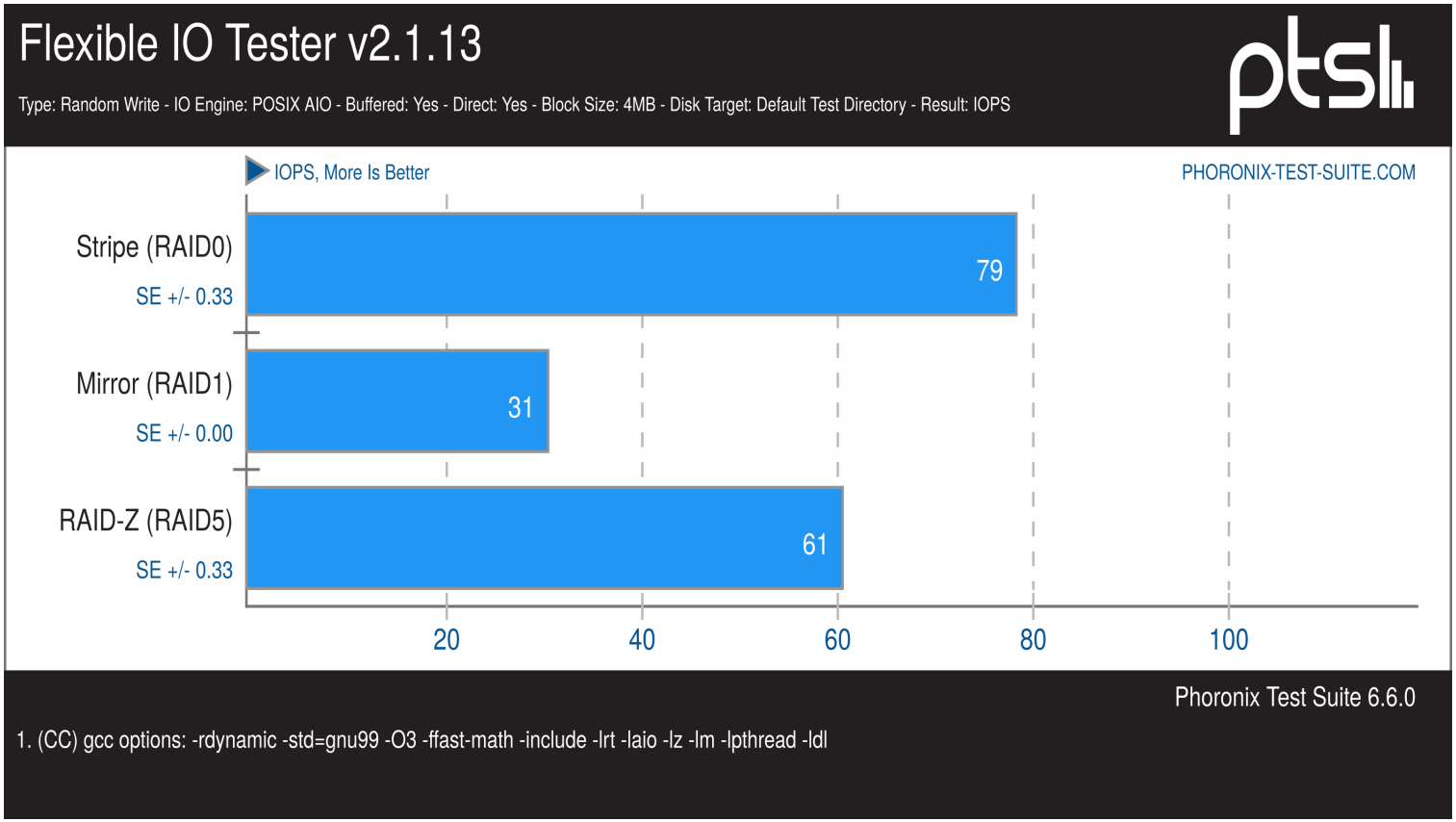
FIO-benchmark: aantal IOPS (Invoer/Uitvoer-bewerkingen per seconde)



Figuur: Aantal IOPS bij random write operaties (blokgrootte: 4MB), uitgevoerd op een Linux MD-opstelling

Benchmarks

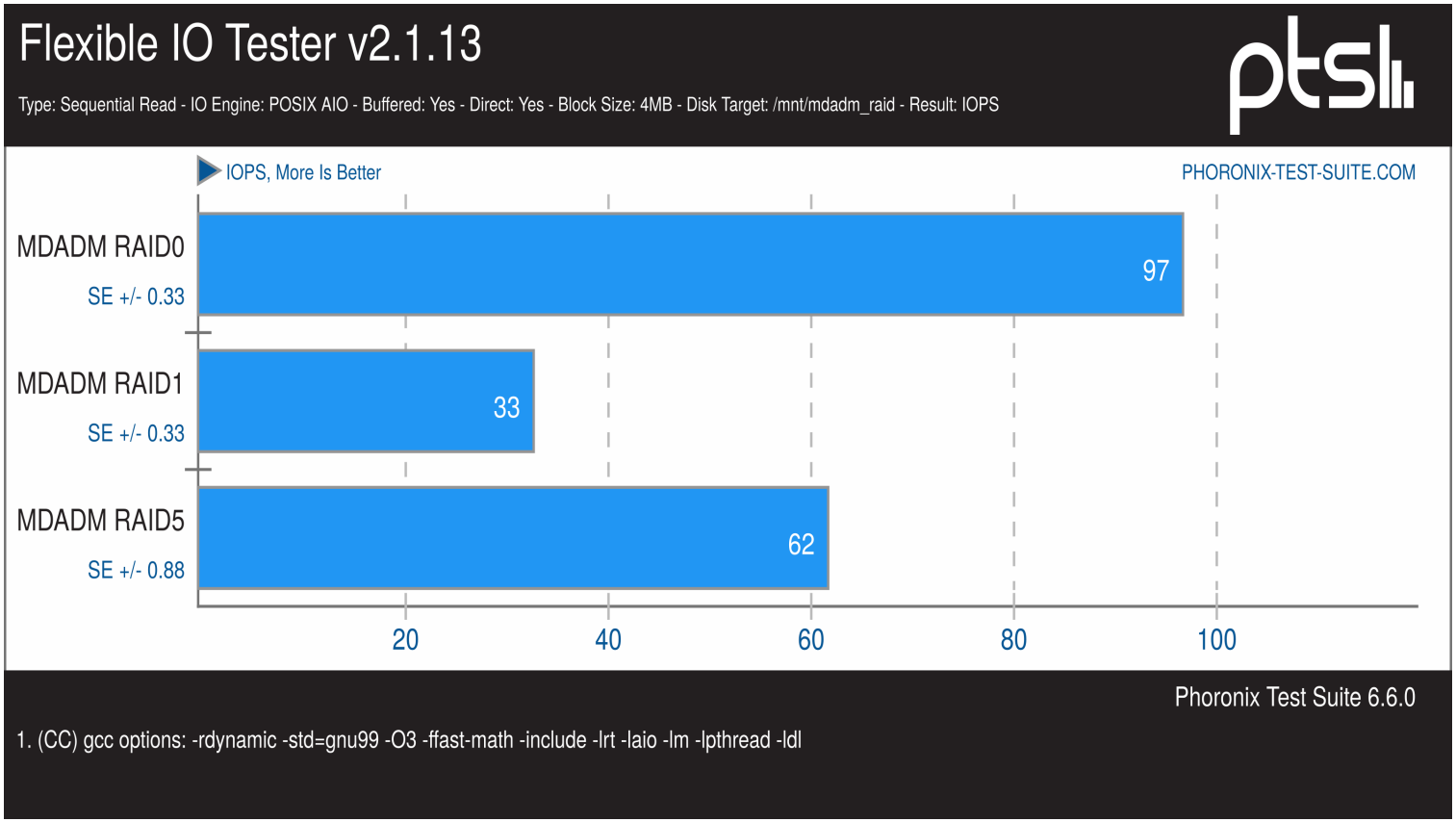
FIO-benchmark: aantal IOPS (Invoer/Uitvoer-bewerkingen per seconde)



Figuur: Aantal IOPS bij random write operaties (blokgrootte: 4MB), uitgevoerd op ZFS-opstelling

Benchmarks

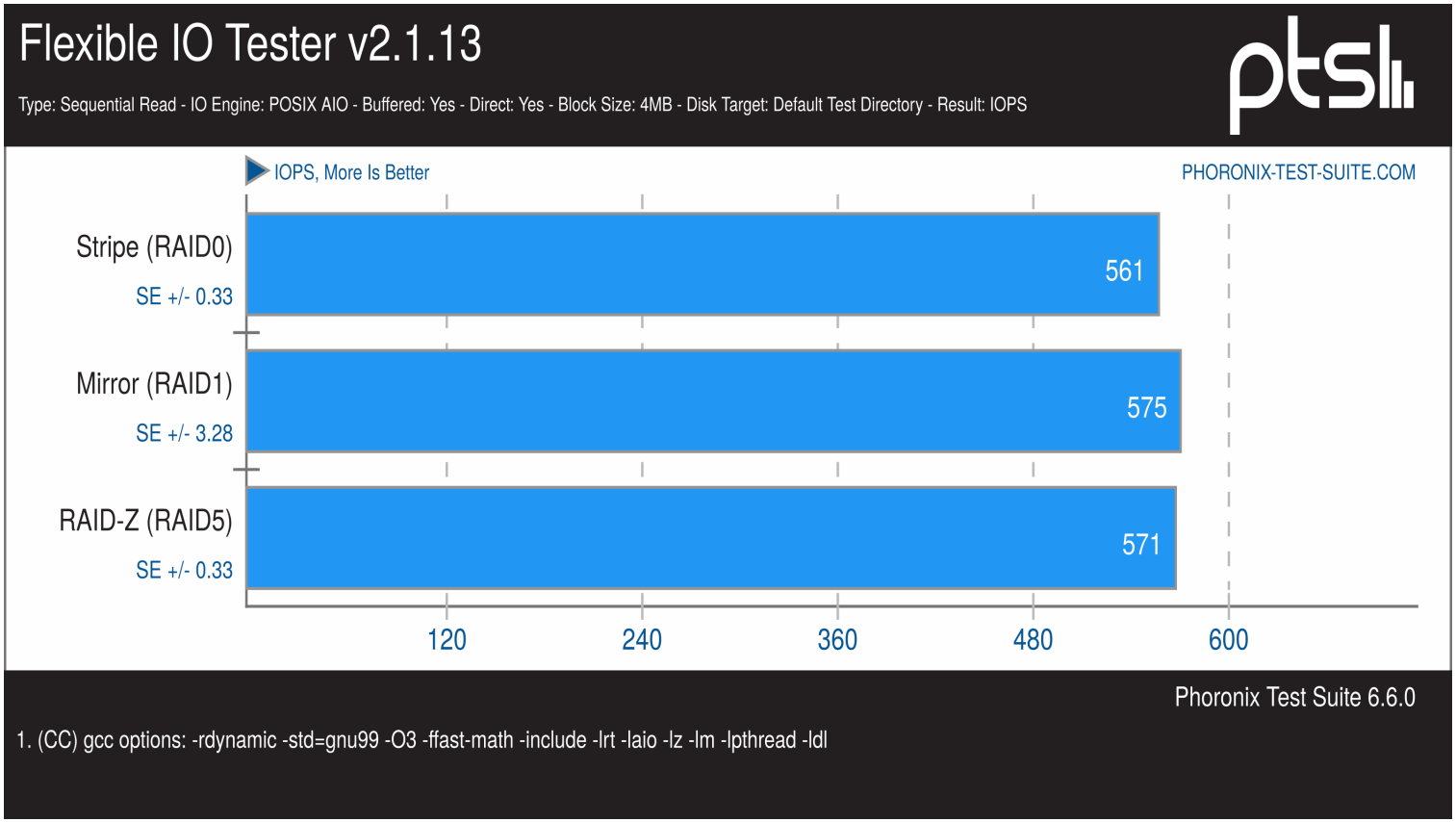
FIO-benchmark: aantal IOPS (Invoer/Uitvoer-bewerkingen per seconde)



Figuur: Aantal IOPS bij sequential read operaties (blokgrootte: 4MB), uitgevoerd op een Linux MD-opstelling

Benchmarks

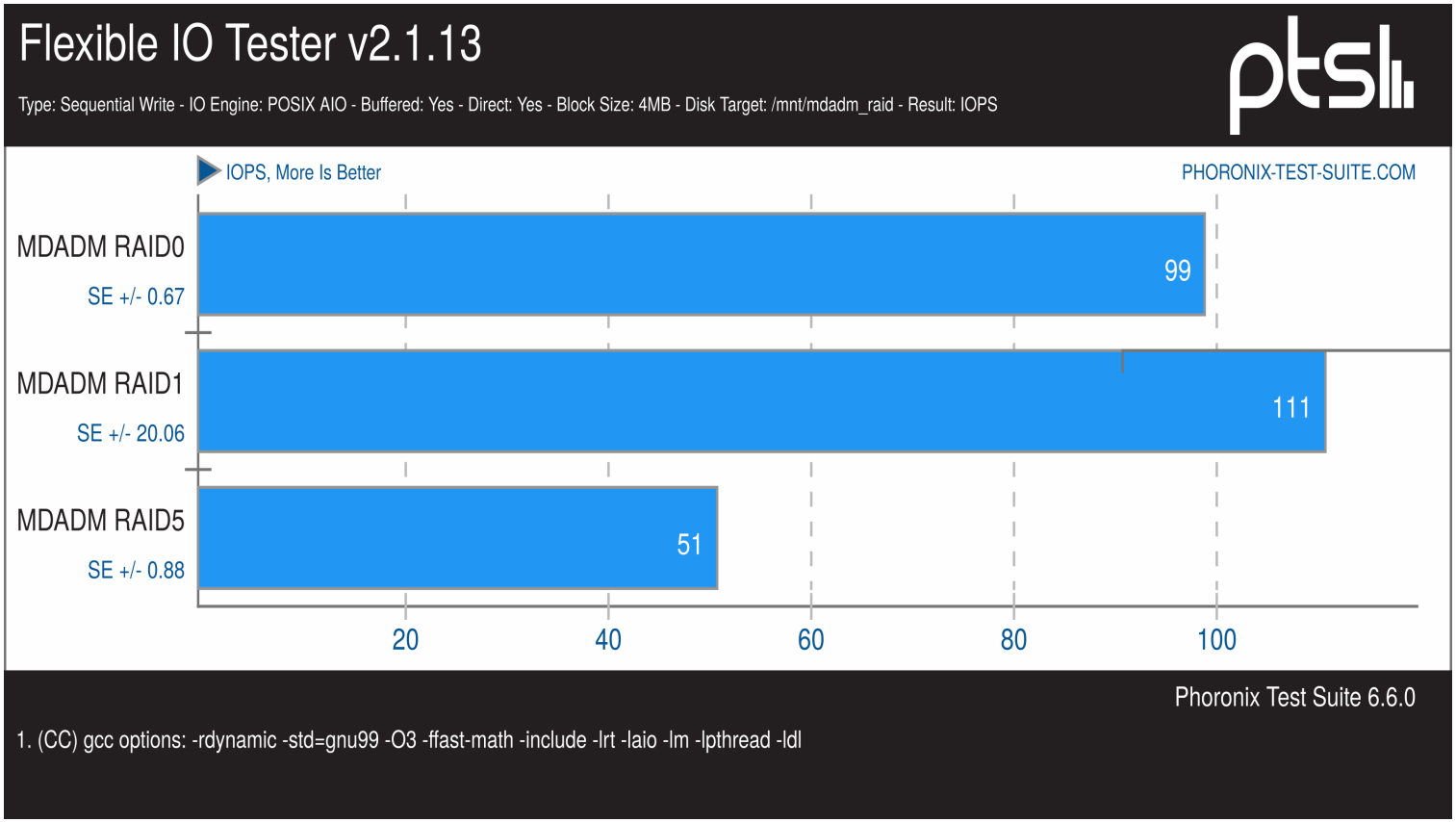
FIO-benchmark: aantal IOPS (Invoer/Uitvoer-bewerkingen per seconde)



Figuur: Aantal IOPS bij sequential read operaties (blokgrootte: 4MB), uitgevoerd op een ZFS-opstelling

Benchmarks

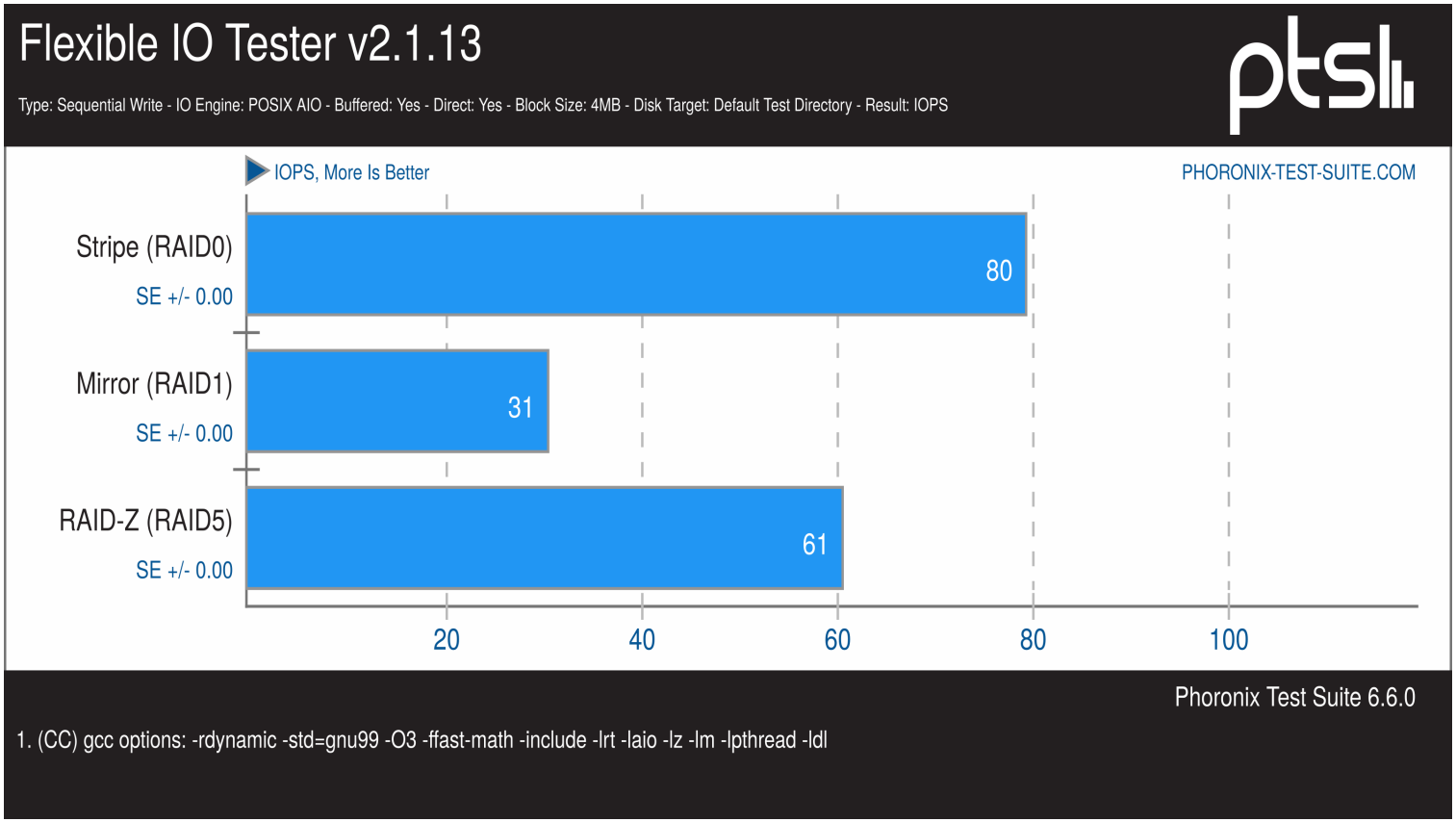
FIO-benchmark: aantal IOPS (Invoer/Uitvoer-bewerkingen per seconde)



Figuur: Aantal IOPS bij sequential write operaties (blokgrootte: 4MB), uitgevoerd op een Linux MD-opstelling

Benchmarks

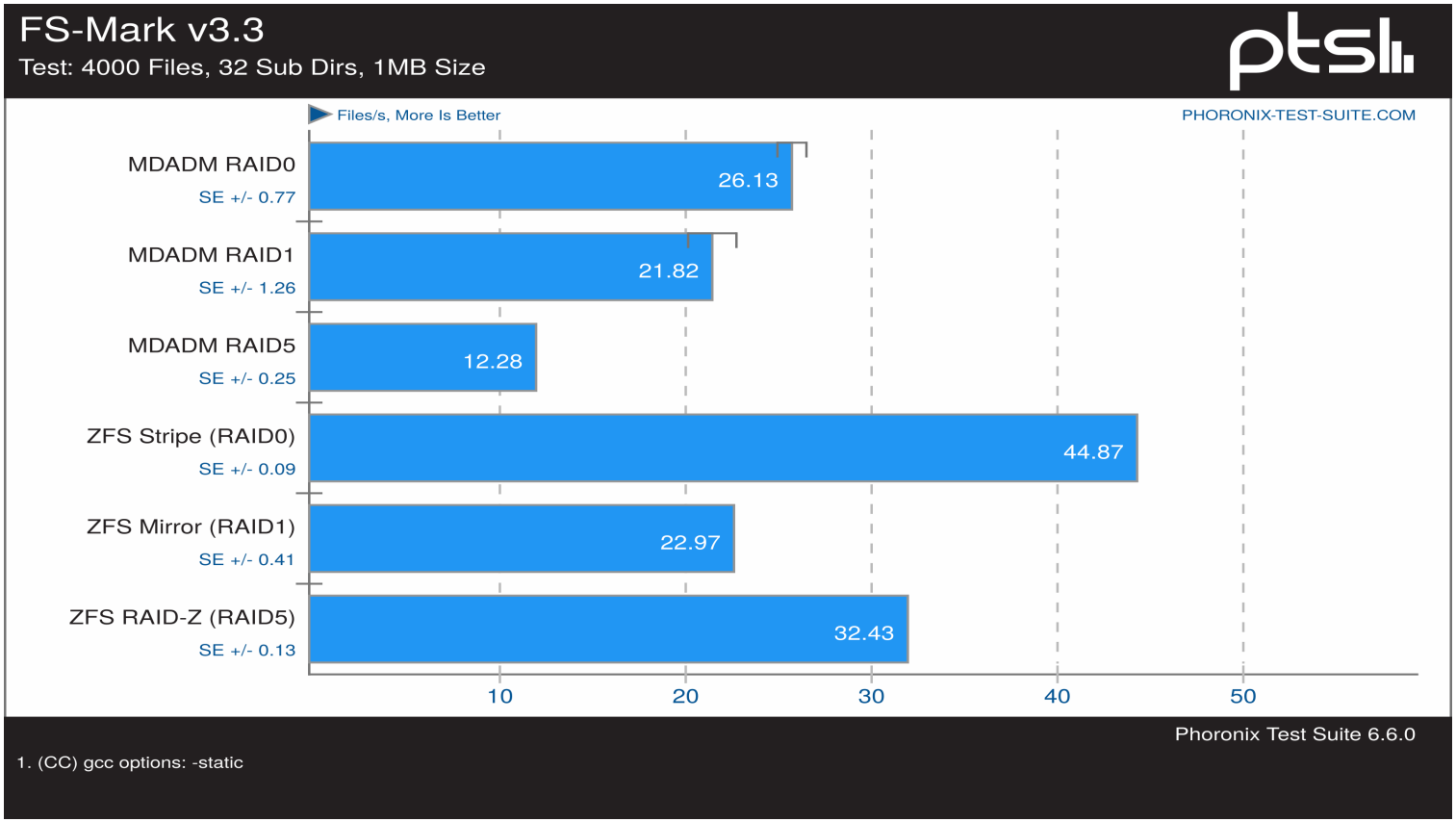
FIO-benchmark: aantal IOPS (Invoer/Uitvoer-bewerkingen per seconde)



Figuur: Aantal IOPS bij sequential write operaties (blokgrootte: 4MB), uitgevoerd op een ZFS-opstelling

Benchmarks

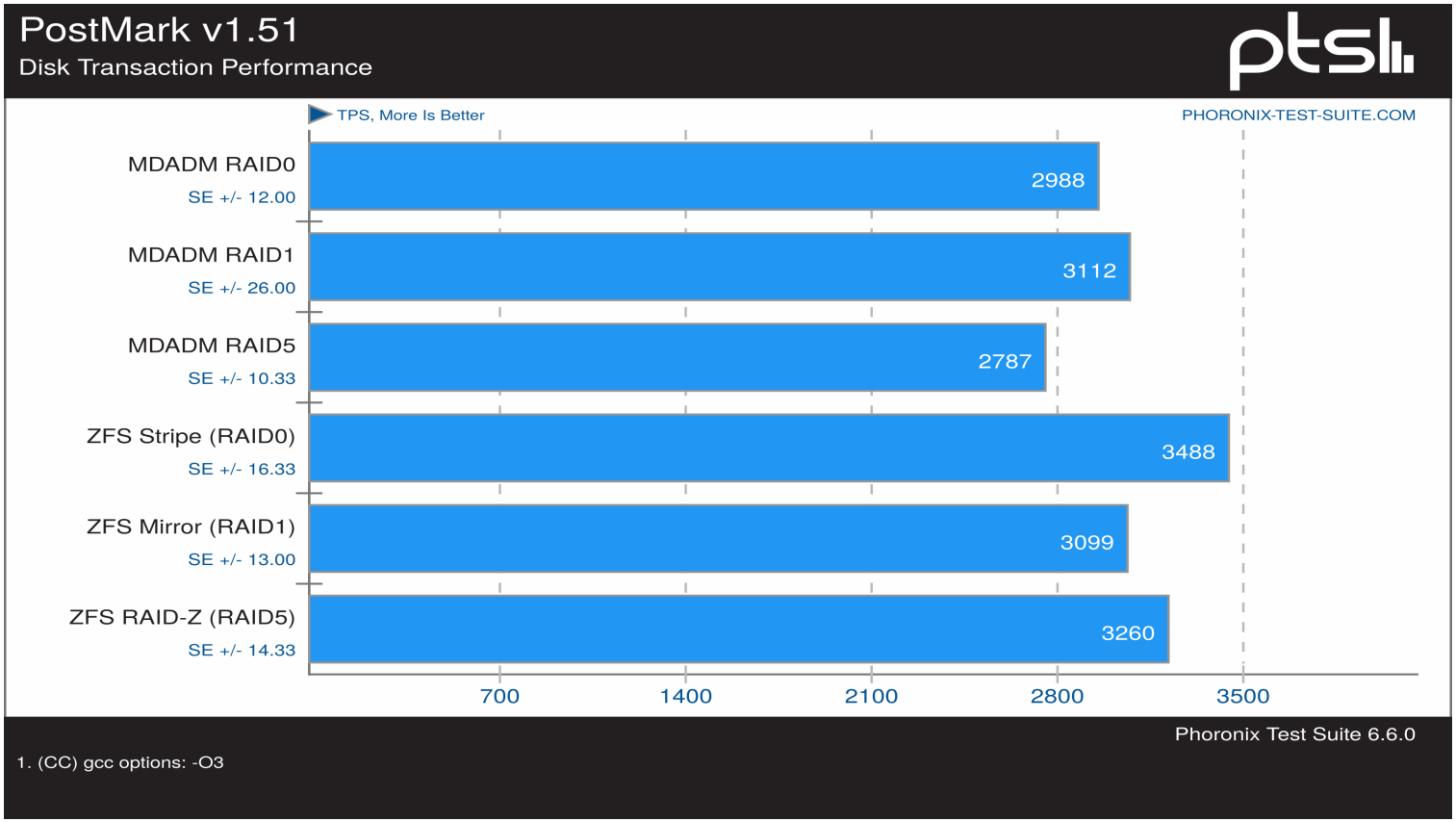
FS-Mark: algemene bestandssysteemperformantie (bestanden per seconde)



Figuur: Vergelijking tussen Linux MD i.c.m. XFS en ZFS inzake algemene bestandssysteemperformantie

Benchmarks

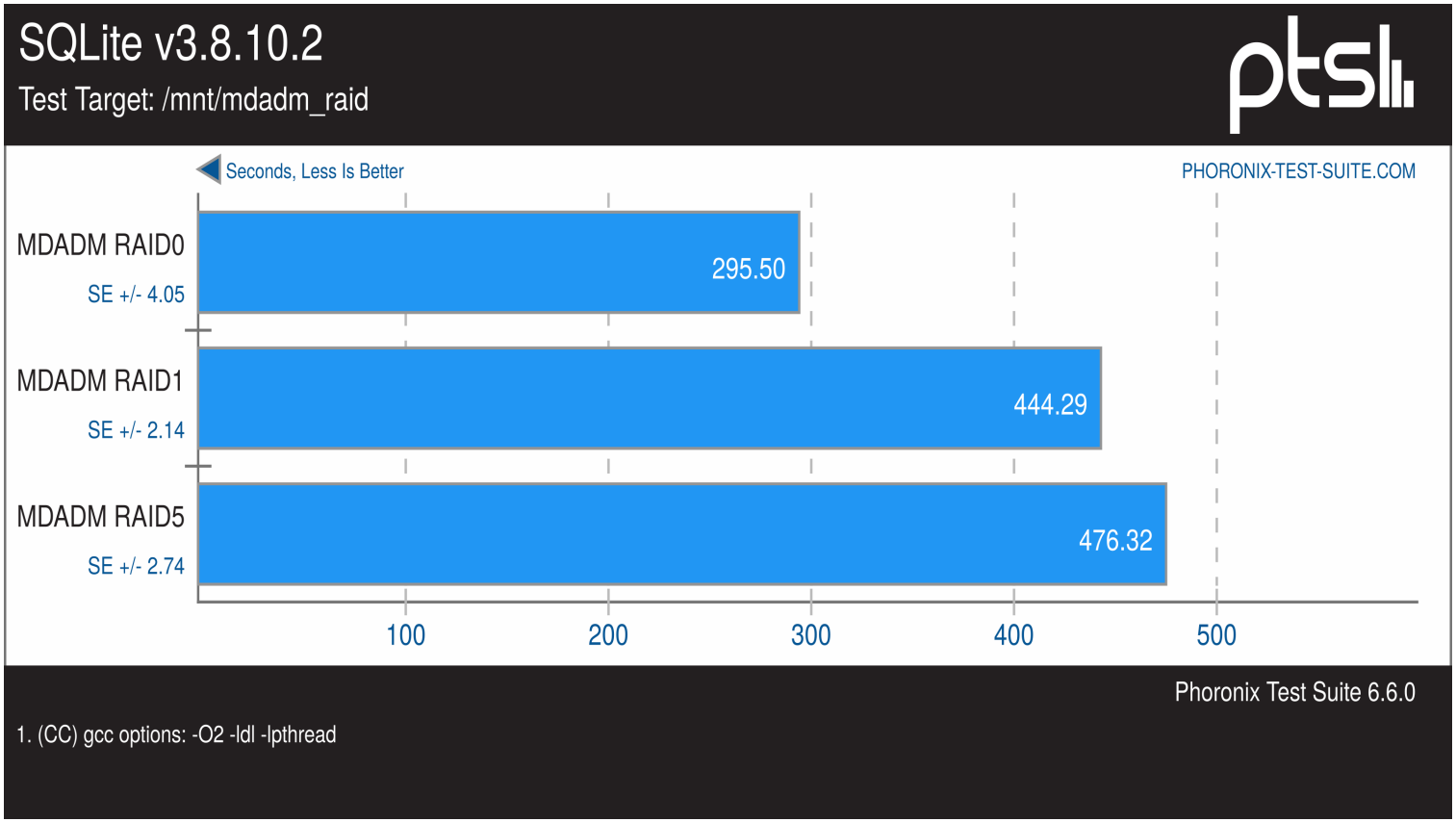
PostMark: Simulatie van de workload van een mail- of webserver



Figuur: Simulatie van een web- of mailserver waarbij de performantie van respectievelijk Linux MD i.c.m. XFS en ZFS met elkaar wordt vergeleken

Benchmarks

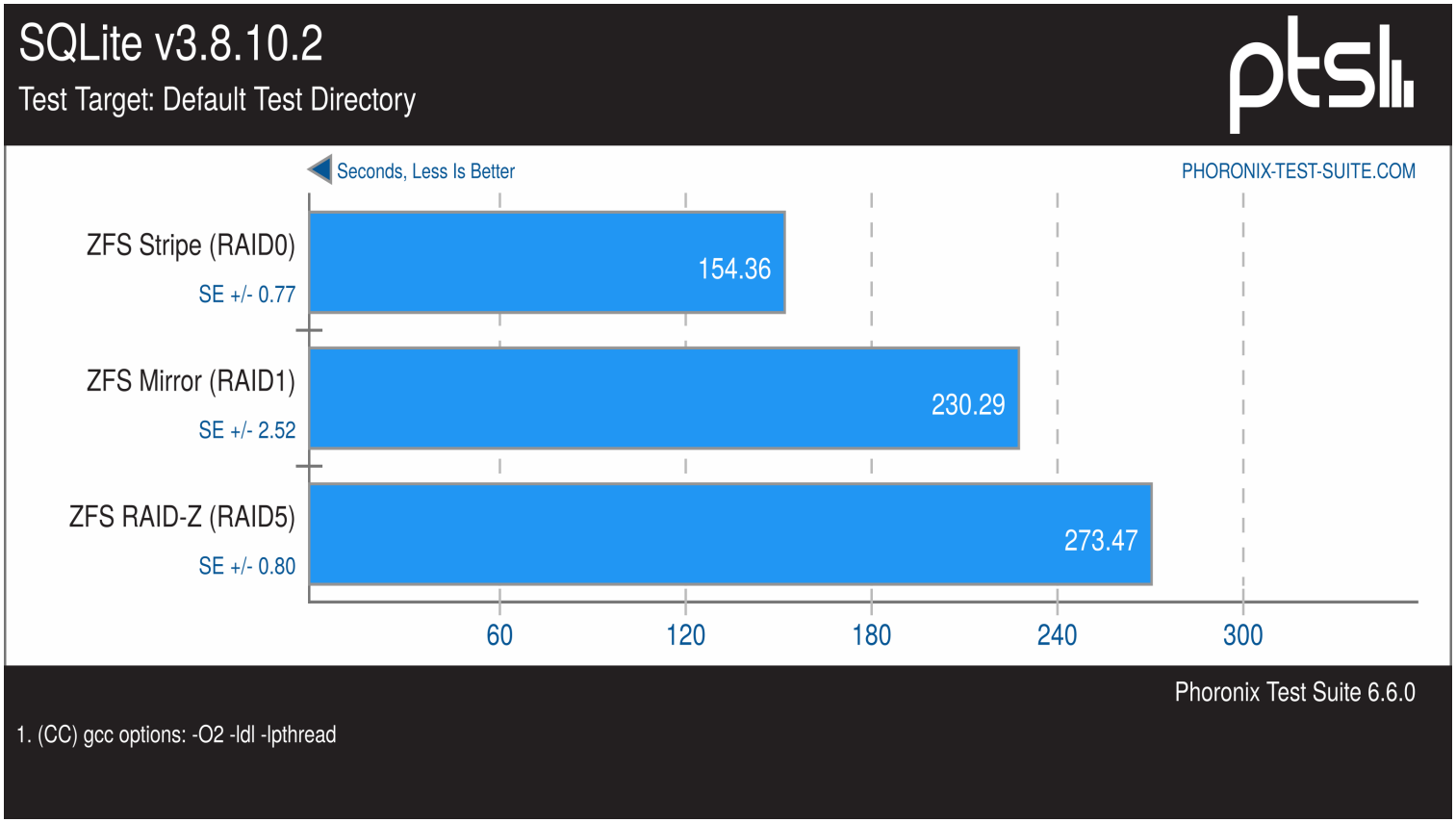
SQLite: Simulatie van de workload van een databanksysteem



Figuur: Performantie van Linux MD i.c.m. XFS bij een groot aantal `INSERT`-bewerkingen op een SQLite-databank

Benchmarks

SQLite: Simulatie van de workload van een databanksysteem



Figuur: Performantie van ZFS bij een groot aantal `INSERT`-bewerkingen op een SQLite-databank

Betrouwbaarheid

- Dataverlies door een gebruikersfout[3]

```
$ zfs snapshot storage@$(date "+%d-%m-%Y")
$ zfs list -t snapshot
NAME                  USED  AVAIL  REFER  MOUNTPOINT
storage@31-05-2017      0      -  69.8G  -
$ rm -f /storage/dummy_2
$ ls -lh /storage/
total 56G
-rw-r--r--. 1 root root 14G May 31 17:18 dummy_1
-rw-r--r--. 1 root root 14G May 31 17:21 dummy_3
-rw-r--r--. 1 root root 14G May 31 17:23 dummy_4
-rw-r--r--. 1 root root 14G May 31 17:24 dummy_5
```

[3] Testdata gegenereerd met: `for i in 1..5; do head -c 15GB </dev/urandom > /storage/dummy_$i; done`

Betrouwbaarheid

- Dataverlies door een gebruikersfout

```
$ zfs rollback storage@31-05-2017
$ ls -lh /storage/
total 70G
-rw-r--r--. 1 root root 14G May 31 17:18 dummy_1
-rw-r--r--. 1 root root 14G May 31 17:19 dummy_2
-rw-r--r--. 1 root root 14G May 31 17:21 dummy_3
-rw-r--r--. 1 root root 14G May 31 17:23 dummy_4
-rw-r--r--. 1 root root 14G May 31 17:24 dummy_5
```

Betrouwbaarheid

- Gedrag van de array bij het wegvallen van een schijf

```
# Op het hostsysteem
$ VBoxManage storageattach "Fedora Server x64" --storagectl "SATA" --port 1 --d

# Op de virtuele machine
$ dmesg
(deel van de uitvoer is weggelaten)

[ 6772.524376] ata2: exception Emask 0x10 SAct 0x0 SErr 0x4010000 action 0xe fr
[ 6772.525402] ata2: irq_stat 0x80400040, connection status changed
[ 6772.525670] ata2: SError: { PHYRdyChg DevExch }
[ 6772.525866] ata2: hard resetting link
[ 6773.198452] ata2: SATA link down (SStatus 0  SControl 300)
```

Betrouwbaarheid

- Gedrag van de array bij het wegvallen van een schijf

```
$ zpool export storage
$ zpool import storage
$ zpool status
  pool: storage
state: DEGRADED
status: One or more devices could not be used because the label is missing or
invalid.  Sufficient replicas exist for the pool to continue
functioning in a degraded state.
action: Replace the device using 'zpool replace'.
  see: http://zfsonlinux.org/msg/ZFS-8000-4J
  scan: none requested
config:

NAME                      STATE     READ WRITE CKSUM
storage                   DEGRADED     0     0     0
  raidz1-0                DEGRADED     0     0     0
    18175546172533204033  UNAVAIL      0     0     0  was /dev/sdb1
    sdc                   ONLINE       0     0     0
    sdd                   ONLINE       0     0     0

errors: No known data errors
```

Betrouwbaarheid

- Gedrag van de array bij het wegvallen van een schijf

```
$ zpool replace storage 18175546172533204033 /dev/sdb -f
$ zpool status
  pool: storage
state: DEGRADED
status: One or more devices is currently being resilvered.  The pool will
continue to function, possibly in a degraded state.
action: Wait for the resilver to complete.
  scan: resilver in progress since Wed May 31 19:35:54 2017
    6.88G scanned out of 105G at 227M/s, 0h7m to go
    2.29G resilvered, 6.56% done
config:

NAME                          STATE     READ WRITE CKSUM
storage                       DEGRADED     0     0     0
  raidz1-0                    DEGRADED     0     0     0
    replacing-0               UNAVAIL      0     0     0
      18175546172533204033    UNAVAIL      0     0     0  was /dev/sdb1/old
      sdb                     ONLINE       0     0     0  (resilvering)
    sdc                       ONLINE       0     0     0
    sdd                       ONLINE       0     0     0

errors: No known data errors
```

Betrouwbaarheid

- Gedrag van de array bij het optreden van silent data corruption

```
$ sha256sum /storage/dummy_1
fc4c5c62db504cec7b5cafa264c329416d0207da9e4a61066bb07563caf9ec2e  /storage/dummy

$ zpool export storage
```

Betrouwbaarheid

- Gedrag van de array bij het optreden van silent data corruption

```
$ zpool import storage
$ zpool status
  pool: storage
state: ONLINE
status: One or more devices has experienced an unrecoverable error.  An
attempt was made to correct the error.  Applications are unaffected.
action: Determine if the device needs to be replaced, and clear the errors
using 'zpool clear' or replace the device with 'zpool replace'.
  see: http://zfsonlinux.org/msg/ZFS-8000-9P
  scan: none requested
config:

NAME        STATE     READ WRITE CKSUM
storage     ONLINE       0     0     0
  raidz1-0  ONLINE       0     0     0
    sdb     ONLINE       0     0     5
    sdc     ONLINE       0     0     0
    sdd     ONLINE       0     0     0

errors: No known data errors
```

Betrouwbaarheid

- Gedrag van de array bij het optreden van silent data corruption

```
$ zpool scrub storage
$ zpool status
  pool: storage
state: ONLINE
status: One or more devices has experienced an unrecoverable error.  An
attempt was made to correct the error.  Applications are unaffected.
action: Determine if the device needs to be replaced, and clear the errors
using 'zpool clear' or replace the device with 'zpool replace'.
  see: http://zfsonlinux.org/msg/ZFS-8000-9P
  scan: scrub repaired 39.0M in 0h0m with 0 errors on Wed May 31 21:58:32 2017
config:

NAME        STATE     READ WRITE CKSUM
storage     ONLINE       0     0     0
  raidz1-0  ONLINE       0     0     0
    sdb     ONLINE       0     0   640
    sdc     ONLINE       0     0     0
    sdd     ONLINE       0     0     0

errors: No known data errors
```

Betrouwbaarheid

- Gedrag van de array bij het optreden van silent data corruption

```
$ sha256sum /storage/dummy_1
4c5c62db504cec7b5cafa264c329416d0207da9e4a61066bb07563caf9ec2e  /storage/dummy_
```

Conclusie

- Performantie: meeste gevallen in het voordeel van ZFS
- Betrouwbaarheid van ZFS is uitstekend
- Voordelen van ZFS: ZVOL's, CoW, ARC, etc.
- Use cases:
  - ZFS: grote SAN's, enthousiastelingen (ECC geheugen?)
  - 'klassieke' RAID: NAS-systemen, consumentensystemen

Referenties I

- Bonwick, J. e.a. (2002). *The Zettabyte Filesystem*. Verkregen van http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.184.3704&rep=rep1&type=pdf
- Kendi, C. (Onbekend). ZFS: Enhancing the Open Source Storage System (and the Kernel). Verkregen van https://www.blackhat.com/presentations/bh-dc-10/Kendi_Christian/Blackhat-DC-2010-Kendi-Enhancing-ZFS-slides.pdf
- Sun Microsystems. (2006). *ZFS on-disk specification*. Verkregen van http://www.giis.co.in/Zfs_ondiskformat.pdf

Zijn er nog vragen?