



HoGent

Faculteit Bedrijf en Organisatie

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

Jonas De Moor

Scriptie voorgedragen tot het bekomen van de graad van
professionele bachelor in de toegepaste informatica

Promotor:
Antonia Pierreux
Co-promotor:
Karine Van Driessche

Instelling: —

Academiejaar: 2016-2017

Tweede examenperiode

Faculteit Bedrijf en Organisatie

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

Jonas De Moor

Scriptie voorgedragen tot het bekomen van de graad van
professionele bachelor in de toegepaste informatica

Promotor:
Antonia Pierreux
Co-promotor:
Karine Van Driessche

Instelling: —

Academiejaar: 2016-2017

Tweede examenperiode

Samenvatting

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus.

Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Voorwoord

Deze bachelorproef duidt het einde aan van mijn opleiding Toegepaste Informatica. Met deze bachelorproef wil ik bewijzen dat ik op een zelfstandige en objectieve manier onderzoek kan voeren over een (nieuwe) technologie in de IT-wereld. Omdat onze branche vrijwel continu onderhevig is aan verandering, vind ik dit een niet-onbelangrijke competentie.

Als onderwerp van deze bachelorproef heb ik besloten om een al wat oudere (maar zeker niet oninteressante) technologie te bespreken: het ZFS bestandssysteem. De redenen waarom ik net dit onderwerp zou willen bespreken, zijn nogal uiteenlopend. Ik ben zelf een enorme Linux- en Unix-fan en ik hou ervan om mezelf nieuwe dingen aan te leren. Met ZFS was ik nog niet vertrouwd, en daar ik toch van plan ben om zelf een homeserver samen te stellen en als bestandssysteem ZFS te gebruiken, leek deze bachelorproef mij een uitstekende opportuniteit om mij wat meer te verdiepen in de werking en implementatie van deze technooogie. Ook hoorde ik hier en daar geruchten vallen over de mogelijke onbetrouwbaarheid van RAID (het zgn.RAID 5 "write hole") en dit was dan ook een reden om onderzoek te voeren naar een mogelijk alternatief.

Deze bachelorproef is het resultaat van vele uren noeste arbeid; het is een werk waar ik enorm trots op ben. Desalniettemin zou dit werk niet mogelijk zijn geweest zonder de hulp van een aantal mensen. Graag neem ik daarom even de tijd om enkele personen te bedanken voor hun steun en toeverlaat gedurende deze periode.

Eerst en vooral zou ik mijn promotor, mevr. Antonia Pierreux, en mijn co-promotor, mevr. Karine Van Driessche, willen bedanken voor het goed laten verlopen van deze periode. Het schrijven van deze scriptie en het voeren van een onderzoek waren geen makkelijke karweien; zonder hun inhoudelijke en technische steun zou deze bachelorproef

nooit mogelijk geweest zijn. Tevens zou ik ook nog graag mijn familie en vrienden willen bedanken voor de onophoudelijke steun en begrip. Ook wil ik graag de mensen van DViT bedanken voor het aanreiken van technische kennis en materiaal voor mijn onderzoek. En *last but not least* wil ik mijn ouders enorm bedanken om mij gedurende deze drie jaar ten volle te steunen: dankzij hen heb ik telkens opnieuw de moed teruggevonden om er met volle teugen tegenaan te gaan in perioden dat het wat moeilijker ging.

Ik hoop dat u evenveel plezier beleeft met het lezen van mijn scriptie als ik had met het schrijven ervan.

Jonas De Moor Academiejaar 2016-2017

Inhoudsopgave

1	Inleiding	9
1.1	Basisbeginselen van RAID	9
1.2	Inleiding tot ZFS & RAID-Z	12
1.3	Probleemstelling en Onderzoeksvragen	14
1.4	Opzet van deze bachelorproef	14
2	Methodologie	15
3	Architectuur en ontwerpprincipes van ZFS	17
3.1	Ontwerpprincipes	17
4	Conclusie	19
	Bibliografie	22

1. Inleiding

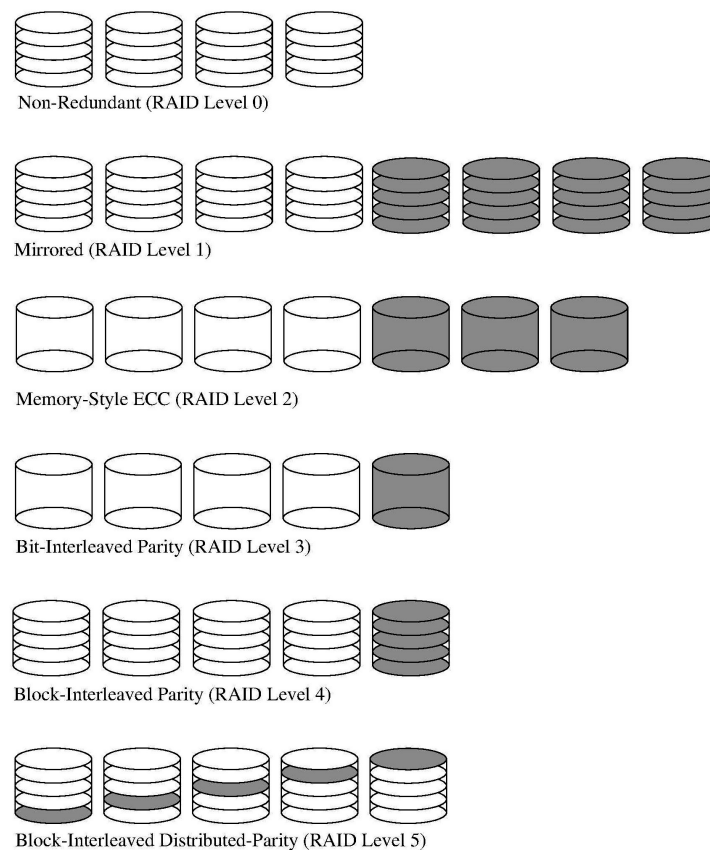
In dit hoofdstuk wordt er een korte inleiding gegeven over de basisprincipes van RAID, aangezien RAID-Z een softwarematige vorm van RAID is. Daarnaast wordt de geschiedenis en globale werking van ZFS reeds kort besproken. Aan het einde van dit hoofdstuk kunnen de probleemstelling en onderzoeksvragen worden teruggevonden, samen met de verdere indeling van deze bachelorproef.

1.1 Basisbeginselen van RAID

Al van oudsher worden magnetische harde schijven gebruikt als opslagmedium voor data (Goda & Kitsuregawa, 2012). Maar reeds in de jaren 80 zagen onderzoekers in dat I/O-performance een bottleneck zou vormen voor computersystemen in de toekomst. Terwijl geheugenchips en processoren steeds sneller werden, bevonden opslagmedia zich in een impasse (David A. Paterson, 1987).

In de paper "*A Case for Redundant Arrays of Inexpensive Disks*" formuleerden David A. Paterson (1987) en zijn collega's voor het eerst de term 'RAID', wat een acroniem is voor 'Redundant Arrays of Inexpensive Disks'. De oorspronkelijke idee achter RAID was dat een verzameling van goedkopere schijven performanter zou zijn dan grotere en duurere mainframeschijven van die tijd.

Naast performantie en kost was betrouwbaarheid (reliability) ook een belangrijke factor. Als bv. één of meerdere schijven van de array falen, dan mag dit geen invloed hebben op de werking van de rest van de verzameling schijven. Daarom introduceerden de onderzoekers de zgn. "RAID levels"(David A. Paterson, 1987), die vandaag de dag nog steeds in gebruik zijn. Er bestaan een aantal RAID-niveaus, waarvan de voornaamste zullen besproken



Figuur 1.1: Illustratie van verschillende RAID-niveaus (Peter M. Chen, 1994)

worden.

Bij het bouwen van RAID-systemen worden er gebruikelijk drie aspecten in beschouwing genomen: **performantie** (performance), **betrouwbaarheid** (reliability) en **capaciteit** (capacity). Een RAID-niveau is in principe niets anders dan een balans tussen deze verschillende eigenschappen; meestal zullen er dus één of meerdere trade-offs moeten gemaakt worden (Peter M. Chen, 1994).

Begrippen die centraal staan bij RAID zijn *striping* en *parity*. Striping heeft betrekking op de manier waarop een RAID-controller (hetzij hardwarematig, hetzij softwarematig) de blokken data verdeelt over de array van schijven. Bij RAID 0 bijvoorbeeld wordt de data gelijkmatig gedistribueerd volgens het *round-robin*-algoritme (Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2015). Datablokken die verdeeld zijn over meerdere schijven en samen één geheel vormen worden een *stripe* genoemd.

Een voordeel bij RAID 0 is dat de gehele capaciteit van de schijven kan gebruikt worden; er gaat geen ruimte verloren, aangezien de data gelijkmatig verdeeld wordt over de array. Een bijkomend voordeel van striping is dat performantie in het algemeen goed is: de meeste reads en writes kunnen parallel worden afgehandeld. Een voorwaarde voor goede performantie is echter wel dat de *chunk size* (de grootte van de blokken data die worden weggeschreven en/of uitgelezen) ook optimaal wordt gekozen, i.e. afhankelijk van

de workload op het systeem (Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2015). Toch kent RAID 0 een groot nadeel: betrouwbaarheid is nagenoeg onbestaande. Aangezien data nergens wordt gedupliceerd, betekent dat het falen van eender welke disk leidt tot verlies van data (Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2015).

Parity is een mechanisme dat werd geïntroduceerd bij RAID-niveau 4 om betrouwbaarheid af te dwingen. Bij RAID 4 wordt er metadata over de opgeslagen data bijgehouden in parity blocks op een aparte schijf. Deze metadata wordt verkregen d.m.v. het uitvoeren van een mathematische functie op de opgeslagen data. Meestal is dit een XOR-functie (exclusieve OF) (Peter M. Chen, 1994). Aan de hand van deze parity kan bij het verlies van één of meerdere schijven de originele data worden gereconstrueerd door XOR'ing toe te passen op de parity bits en de data bits. Bij een XOR-operatie geven een even aantal enen (1) steeds als resultaat nul (0); omgekeerd geldt ook dat een oneven aantal enen (1) steeds een één (1) als resultaat zullen opleveren. Stel dat één schijf van een array van vier schijven faalt, dan kan nog steeds de originele data worden verkregen. Echter, als er meer dan één schijf verloren gaat, dan is het bij RAID 4 onmogelijk om de originele data te herstellen. Het grote voordeel van RAID 4 is dan weer echter dat er minder wordt ingeboet op capaciteit dan bij bv. RAID 1 en RAID 5 (Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2015).

Naast RAID 0 en RAID 4 zijn er nog andere RAID-levels, zoals RAID 1 en RAID 5. RAID 1 staat ook bekend als *mirroring*, omdat het kopieën maakt van de datablokken naar één of meerdere disks afhankelijk van het aantal schijven. Op gebied van capaciteit is RAID 1 niet echt gunstig, aangezien maar de helft van de totale schijfruimte bruikbaar is. Stel dat er vier schijven in een array aanwezig zijn, dan is slechts de opslagcapaciteit van twee schijven bruikbaar. Daarentegen is de betrouwbaarheid van RAID 1 wel vele malen beter dan die van RAID 0: in theorie mogen er bij een reeks van n schijven $\frac{n}{2}$ schijven falen. Maar dan mogen de schijven die elkaars mirror zijn niet falen, want dan is de data op deze disks verloren. Daarom houdt men in de praktijk meestal de maatstaf van één schijf aan (Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2015).

Als laatste wordt RAID 5 besproken. RAID 5 is in principe niets anders dan RAID-niveau 4, maar dan uitgebreid met functionaliteit dat de parity blocks roteert over de verschillende schijven. Dit is een groot verschil t.o.v. RAID 4, waarbij de parity blocks zich op één disk bevinden. Read-performantie is nagenoeg gelijk aan RAID 4, maar write-performantie is stukken beter. Dit komt omdat bij RAID 5 de schrijfoperaties parallel kunnen worden afgehandeld; bij RAID 4 vormt de parity-schijf een *bottleneck* bij het wegschrijven van data (Peter M. Chen, 1994). De reden hiervoor is dat bij het updaten van data ook de parity blocks moeten worden geüpdatet; alle operaties worden dus m.a.w. serieel uitgevoerd (Arpaci-Dusseau & Arpaci-Dusseau, 2015).

Er bestaan nog andere, niet-standaard RAID levels, zoals RAID 6 en RAID 10, maar deze worden hier niet besproken.

1.2 Inleiding tot ZFS & RAID-Z

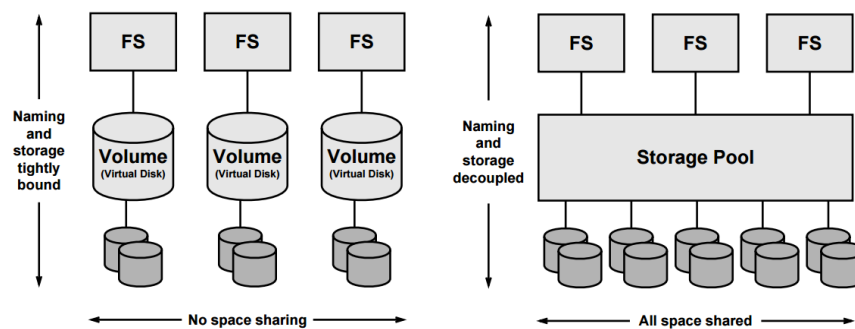
ZFS is een bestandssysteem dat ontwikkeld is door het toenmalige Sun Microsystems, nu onderdeel van Oracle Corporation. Voormalig Sun-werknemer Jeff Bonwick was de oorspronkelijke hoofdontwikkelaar achter het bestandssysteem. De ontwikkeling van ZFS startte aan het begin van de jaren 2000; Sun had reeds met de ontwikkeling van bestandssystemen geëxperimenteerd, maar deze pogingen mislukten telkens (Bonwick, 2015, oktober 21). ZFS is een *copy-on-write* (COW) bestandssysteem (Brian Hickmann, 2007): bij elke aanpassing van een datablok, wordt er eerst een nieuw blok aangemaakt, waarna het aangepaste datablok naar het nieuwe, lege datablok wordt gekopieerd (Jeff Bonwick, 2002).

In die tijd gebruikte het bedrijf haar UNIX-besturingssysteem Solaris intern voor verschillende soorten toepassingen, waaronder file servers (Bonwick, 2015, oktober 21). De schijven van deze servers waren opgedeeld in volumes, beheerd door de Solaris Volume Manager (SVM) en geformatteerd in UFS (UNIX Filesystem) (Bonwick, 2015, oktober 21). Toen een verkeerd ingevoerd SVM-commando erin slaagde om het systeem te doen crashen en voor een enorme *downtime* zorgde bij Sun, was dit voor Bonwick een aanleiding om volledig van de grond op een bestandssysteem op te bouwen dat makkelijk in gebruik én beheer was. Het was toen dat Bonwick (2015, oktober 21) zich afvroeg "waarom het zo pijnlijk is om opslag te beheren".

De hoofdreden om een volledig nieuw bestandssysteem te ontwikkelen was volgens Bonwick en Moore (Unknown) dat de toenmalige oplossingen voor bestandssystemen totaal achterhaald waren. Bestandssystemen waren nog ontwikkeld voor opslagnoden uit de jaren '80 en '90, welke niet te vergelijken zijn met de huidige noden van zowel bedrijven als particulieren. Naarmate de nood aan meer opslagruimte steeg, moesten er oplossingen worden bedacht, en dit m.b.v. bestandssystemen die hier helemaal niet op voorzien waren. Een 'tussenoplossing', aldus volgens Bonwick en Moore (Unknown), die ook vandaag de dag nog gebruikt wordt, is de combinatie van volumes en bestandssystemen. Volumes zijn abstracties voor (delen van) fysieke schijven; typisch maakt men één bestandssysteem per volume aan.

Een andere eigenaardigheid van bestandssystemen is dat deze nog steeds onlosmakelijk zijn verbonden aan een (deel van) een schijf of opslagapparaat. Volume managers zorgen wel voor een zeker niveau van abstractie, maar bestandssystemen blijven nog steeds gekoppeld aan een bepaalde reeks blokken (Jeff Bonwick, 2002). Dit vonden de ontwikkelaars van ZFS nogal omslachtig: zij zijn van mening dat een bestandssysteem een virtuele abstractie van opslagruimte vormt en dus los moet staan van de fysieke blokken op de schijf. Jeff Bonwick (2002) maakt de vergelijking met het adresseren van RAM geheugen: RAM-geheugen moet ook eerst niet worden geformatteerd en dan apart worden toegewezen aan applicaties. Bij het alloceren en aanspreken van RAM-geheugen is het immers niet nodig voor de applicatie of programmeur om het exacte geheugenadres te kennen; deze taken worden al afgehandeld door memory allocators m.b.v. virtueel geheugen (Jeff Bonwick, 2002).

Daarom stelden de ZFS-ontwikkelaars *pooled storage* voor, samen met een geïntegreerde



Figuur 1.2: De combinatie van volumes en bestandssystemen (links) vergeleken met de aanpak van ZFS (rechts) (Jeff Bonwick, 2002)

volume manager en storage allocator. Een bijkomend voordeel van *pooled storage* is dat bestandssystemen dynamisch kunnen groeien en verkleinen, zonder tussenkomst van de gebruiker, aangezien de opslagruimte van alle disks als één geheel wordt gezien i.p.v. afzonderlijke eenheden. ZFS maakt het wel mogelijk om quota's in te stellen op bestandssystemen, opdat één bestandssystemen niet alle beschikbare ruimte zou innemen (Jeff Bonwick, 2002).

Het ZFS-bestandssysteem omvat ook een softwarematige RAID, RAID-Z genaamd. Volgens Bonwick (2005, november 17) lost RAID-Z in combinatie met ZFS een aantal problemen op die inherent aanwezig zijn bij andere RAID-implementaties. Zo claimen de ontwikkelaars dat RAID-Z het zogenaamde RAID5 *write hole* probleem volledig oplost. Bij klassieke RAID-oplossingen worden stripes weggeschreven op een niet-atomaire manier, i.e. de bewerkingen worden niet als één geheel uitgevoerd. Een bijkomend probleem hierbij is dat bij RAID-levels met *parity* (zoals RAID5) ook nog eens de parity-blocks moeten herberekend worden. Indien het systeem tussen deze bewerkingen crasht of uitvalt door bv. elektriciteitsproblemen, dan bevindt de data op de array van schijven zich in een inconsistente toestand: stripes en parity blocks kunnen corrupt raken (Bonwick, 2005, november 17).

Een oplossing voor dit probleem is het gebruik van NVRAM waarin stripes tijdelijk kunnen worden bijgehouden. Indien er zich dan een systeemcrash voordoet, dan kan de RAID-controller m.b.v. de gegevens in het NVRAM de originele data herstellen. Maar waar RAID geen oplossing voor heeft, aldus volgens Bonwick (2005, november 17), is het optreden van *silent data corruption*; de RAID-controller weet immers niet of het al dan niet om corrupte data gaat. Het enige waar een RAID-controller zicht op heeft, zijn blokken. Hiervoor biedt ZFS samen met RAID-Z een oplossing: aangezien het bestandssysteem en RAID-Z samen één geheel vormen, is het mogelijk om van datacorruptie te herstellen of om dit zelfs tegen te gaan. Bij het herstellen van data op de array, overloopt RAID-Z de metadata van het bestandssysteem om zo de stripe-grootte te achterhalen. Ook vergelijkt ZFS bij elk datablok de berekende checksum: indien deze checksums niet overeenkomen, dan tracht ZFS dit blok te repareren m.b.v. de parity-informatie van RAID-Z. Op deze manier kan datacorruptie vroegtijdig worden opgemerkt en kan defecte hardware eventueel vervangen worden (Bonwick, 2005, november 17).

Ondertussen werd Sun Microsystems overgenomen door Oracle in 2010, na het faillissement van deze eerstgenoemde (Oracle, Onbekend). In 2010 richtten enkele ontwikkelaars van Solaris het illumos-project op met de bedoeling om een volledig open source variant van OpenSolaris te ontwikkelen; ook ZFS werd verder ontwikkeld als onderdeel van illumos (illumos, 2012, augustus 20). De reden hiervoor was dat Oracle geen nieuwe uitgaven meer uitbracht voor OpenSolaris. In 2013 werd het OpenZFS-project opgericht, dat zichzelf als de "*ware en open opvolger van het oorspronkelijke ZFS-project*" ziet (OpenZFSProject, 2014).

Mede dankzij dit project is ZFS ondertussen beschikbaar op verschillende platformen, waaronder FreeBSD, Linux en macOS.

1.3 Probleemstelling en Onderzoeksvragen

Aangezien (een deel van) de RAID-functionaliteit van BTRFS nog niet als *production-ready* wordt beschouwd (Project, 2014, maart 4), zal ZFS worden beschouwd en geëvalueerd als volwaardig alternatief voor klassieke RAID-oplossingen op Linux-systemen.

Deze bachelorproef zal een antwoord trachten te vinden op volgende vragen:

- 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?
- Komt ZFS zijn beloften qua data-integriteit en performantie¹ na onder verschillende workloads en toepassingen?

1.4 Opzet van deze bachelorproef

De rest van deze bachelorproef is als volgt opgebouwd:

In Hoofdstuk 2 wordt de methodologie toegelicht en worden de gebruikte onderzoekstechnieken besproken om een antwoord te kunnen formuleren op de onderzoeksvragen.

In Hoofdstuk 3 wordt er een globaal overzicht gegeven van de architectuur en ontwerpprincipes van ZFS. In de daaropvolgende hoofdstukken worden de belangrijkste onderdelen en functionaliteiten wat meer uitgediept.

In Hoofdstuk 4, tenslotte, wordt de conclusie gegeven en een antwoord geformuleerd op de onderzoeksvragen. Daarbij wordt ook een aanzet gegeven voor toekomstig onderzoek binnen dit domein.

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

2. Methodologie

Etiam pede massa, dapibus vitae, rhoncus in, placerat posuere, odio. Vestibulum luctus commodo lacus. Morbi lacus dui, tempor sed, euismod eget, condimentum at, tortor. Phasellus aliquet odio ac lacus tempor faucibus. Praesent sed sem. Praesent iaculis. Cras rhoncus tellus sed justo ullamcorper sagittis. Donec quis orci. Sed ut tortor quis tellus euismod tincidunt. Suspendisse congue nisl eu elit. Aliquam tortor diam, tempus id, tristique eget, sodales vel, nulla. Praesent tellus mi, condimentum sed, viverra at, consectetur quis, lectus. In auctor vehicula orci. Sed pede sapien, euismod in, suscipit in, pharetra placerat, metus. Vivamus commodo dui non odio. Donec et felis.

Etiam suscipit aliquam arcu. Aliquam sit amet est ac purus bibendum congue. Sed in eros. Morbi non orci. Pellentesque mattis lacinia elit. Fusce molestie velit in ligula. Nullam et orci vitae nibh vulputate auctor. Aliquam eget purus. Nulla auctor wisi sed ipsum. Morbi porttitor tellus ac enim. Fusce ornare. Proin ipsum enim, tincidunt in, ornare venenatis, molestie a, augue. Donec vel pede in lacus sagittis porta. Sed hendrerit ipsum quis nisl. Suspendisse quis massa ac nibh pretium cursus. Sed sodales. Nam eu neque quis pede dignissim ornare. Maecenas eu purus ac urna tincidunt congue.

Donec et nisl id sapien blandit mattis. Aenean dictum odio sit amet risus. Morbi purus. Nulla a est sit amet purus venenatis iaculis. Vivamus viverra purus vel magna. Donec in justo sed odio malesuada dapibus. Nunc ultrices aliquam nunc. Vivamus facilisis pellentesque velit. Nulla nunc velit, vulputate dapibus, vulputate id, mattis ac, justo. Nam mattis elit dapibus purus. Quisque enim risus, congue non, elementum ut, mattis quis, sem. Quisque elit.

Maecenas non massa. Vestibulum pharetra nulla at lorem. Duis quis quam id lacus dapibus interdum. Nulla lorem. Donec ut ante quis dolor bibendum condimentum. Etiam egestas

tortor vitae lacus. Praesent cursus. Mauris bibendum pede at elit. Morbi et felis a lectus interdum facilisis. Sed suscipit gravida turpis. Nulla at lectus. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Praesent nonummy luctus nibh. Proin turpis nunc, congue eu, egestas ut, fringilla at, tellus. In hac habitasse platea dictumst.

Vivamus eu tellus sed tellus consequat suscipit. Nam orci orci, malesuada id, gravida nec, ultricies vitae, erat. Donec risus turpis, luctus sit amet, interdum quis, porta sed, ipsum. Suspendisse condimentum, tortor at egestas posuere, neque metus tempor orci, et tincidunt urna nunc a purus. Sed facilisis blandit tellus. Nunc risus sem, suscipit nec, eleifend quis, cursus quis, libero. Curabitur et dolor. Sed vitae sem. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Maecenas ante. Duis ullamcorper enim. Donec tristique enim eu leo. Nullam molestie elit eu dolor. Nullam bibendum, turpis vitae tristique gravida, quam sapien tempor lectus, quis pretium tellus purus ac quam. Nulla facilisi.

3. Architectuur en ontwerpprincipes van ZFS

3.1 Ontwerpprincipes

4. Conclusie

Curabitur nunc magna, posuere eget, venenatis eu, vehicula ac, velit. Aenean ornare, massa a accumsan pulvinar, quam lorem laoreet purus, eu sodales magna risus molestie lorem. Nunc erat velit, hendrerit quis, malesuada ut, aliquam vitae, wisi. Sed posuere. Suspendisse ipsum arcu, scelerisque nec, aliquam eu, molestie tincidunt, justo. Phasellus iaculis. Sed posuere lorem non ipsum. Pellentesque dapibus. Suspendisse quam libero, laoreet a, tincidunt eget, consequat at, est. Nullam ut lectus non enim consequat facilisis. Mauris leo. Quisque pede ligula, auctor vel, pellentesque vel, posuere id, turpis. Cras ipsum sem, cursus et, facilisis ut, tempus euismod, quam. Suspendisse tristique dolor eu orci. Mauris mattis. Aenean semper. Vivamus tortor magna, facilisis id, varius mattis, hendrerit in, justo. Integer purus.

Vivamus adipiscing. Curabitur imperdiet tempus turpis. Vivamus sapien dolor, congue venenatis, euismod eget, porta rhoncus, magna. Proin condimentum pretium enim. Fusce fringilla, libero et venenatis facilisis, eros enim cursus arcu, vitae facilisis odio augue vitae orci. Aliquam varius nibh ut odio. Sed condimentum condimentum nunc. Pellentesque eget massa. Pellentesque quis mauris. Donec ut ligula ac pede pulvinar lobortis. Pellentesque euismod. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent elit. Ut laoreet ornare est. Phasellus gravida vulputate nulla. Donec sit amet arcu ut sem tempor malesuada. Praesent hendrerit augue in urna. Proin enim ante, ornare vel, consequat ut, blandit in, justo. Donec felis elit, dignissim sed, sagittis ut, ullamcorper a, nulla. Aenean pharetra vulputate odio.

Quisque enim. Proin velit neque, tristique eu, eleifend eget, vestibulum nec, lacus. Vivamus odio. Duis odio urna, vehicula in, elementum aliquam, aliquet laoreet, tellus. Sed velit. Sed vel mi ac elit aliquet interdum. Etiam sapien neque, convallis et, aliquet vel, auctor non, arcu. Aliquam suscipit aliquam lectus. Proin tincidunt magna sed wisi. Integer blandit

lacus ut lorem. Sed luctus justo sed enim.

Morbi malesuada hendrerit dui. Nunc mauris leo, dapibus sit amet, vestibulum et, commodo id, est. Pellentesque purus. Pellentesque tristique, nunc ac pulvinar adipiscing, justo eros consequat lectus, sit amet posuere lectus neque vel augue. Cras consectetur libero ac eros. Ut eget massa. Fusce sit amet enim eleifend sem dictum auctor. In eget risus luctus wisi convallis pulvinar. Vivamus sapien risus, tempor in, viverra in, aliquet pellentesque, eros. Aliquam euismod libero a sem.

Nunc velit augue, scelerisque dignissim, lobortis et, aliquam in, risus. In eu eros. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Curabitur vulputate elit viverra augue. Mauris fringilla, tortor sit amet malesuada mollis, sapien mi dapibus odio, ac imperdiet ligula enim eget nisl. Quisque vitae pede a pede aliquet suscipit. Phasellus tellus pede, viverra vestibulum, gravida id, laoreet in, justo. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Integer commodo luctus lectus. Mauris justo. Duis varius eros. Sed quam. Cras lacus eros, rutrum eget, varius quis, convallis iaculis, velit. Mauris imperdiet, metus at tristique venenatis, purus neque pellentesque mauris, a ultrices elit lacus nec tortor. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent malesuada. Nam lacus lectus, auctor sit amet, malesuada vel, elementum eget, metus. Duis neque pede, facilisis eget, egestas elementum, nonummy id, neque.

Bibliografie

- Arpaci-Dusseau, R. H. & Arpaci-Dusseau, A. C. (2015). *Operating Systems: Three Easy Pieces* (0.91). Arpaci-Dusseau Books.
- Bonwick, J. (2005, november 17). RAID-Z. Verkregen 2 april 2017, van https://blogs.oracle.com/bonwick/entry/raid_z
- Bonwick, J. (2015, oktober 21). The Birth of ZFS by Jeff Bonwick. OpenZFS Project. Verkregen 30 maart 2017, van <https://www.youtube.com/watch?v=dcV2PaMTAJ4&feature=youtu.be>
- Bonwick, J. & Moore, B. (Unknown). ZFS The Last Word In File Systems. Sun Microsystems. Verkregen van https://wiki.illumos.org/download/attachments/1146951/zfs_last.pdf
- Brian Hickmann, K. S. (2007). *ZFS and RAID-Z: The Uber-FS?* Verkregen van <http://pages.cs.wisc.edu/~remzi/Courses/736/Fall2007/Projects/BrianKynan/paper.pdf>
- David A. Paterson, e. a. (1987). *A Case for Redundant Arrays of Inexpensive Disks*. University of California, Berkeley. Verkregen van <https://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/1987/CSD-87-391.pdf>
- Goda, K. & Kitsuregawa, M. (2012). *The History of Storage Systems*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Verkregen van <http://ieeexplore.ieee.org/document/6182574/>
- illumos. (2012, augustus 20). illumos Project Announcement - August 3, 2010. Verkregen van <https://wiki.illumos.org/display/illumos/illumos+Project+Announcement+-+August+3%2C+2010>
- Jeff Bonwick, 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>
- OpenZFSProject. (2014). History - OpenZFS. Verkregen van <http://open-zfs.org/wiki/History>

- Oracle. (Onbekend). Oracle and Sun Microsystems. Verkregen van <https://www.oracle.com/sun/index.html>
- Peter M. Chen, e. a. (1994). *RAID: High-Performance, Reliable Secondary Storage*. University of Michigan , Carnegie Mellon University , University of California (Berkeley). Verkregen van <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=59E48A55C27748208046D52C5730C98F?doi=10.1.1.41.3889&rep=rep1&type=pdf>
- Project, B. (2014, maart 4). Status. Verkregen van <https://btrfs.wiki.kernel.org/index.php/Status>

Lijst van figuren

1.1	Illustratie van verschillende RAID-niveaus (Peter M. Chen, 1994) . .	10
1.2	De combinatie van volumes en bestandssystemen (links) vergeleken met de aanpak van ZFS (rechts) (Jeff Bonwick, 2002)	13

Lijst van tabellen