



Departement IT en Digitale Innovatie

Container orkestratie security: indentificeren van problemen en onderzoek naar de impact van security tools

Nick Heymans

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

Promotor:
Wim De Bruyn
Co-promotor:
Steven Trescinski

Instelling: —

Academiejaar: 2020-2021

Tweede examenperiode

Departement IT en Digitale Innovatie

Container orkestratie security: indentificeren van problemen en onderzoek naar de impact van security tools

Nick Heymans

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

Promotor:
Wim De Bruyn
Co-promotor:
Steven Trescinski

Instelling: —

Academiejaar: 2020-2021

Tweede examenperiode

Woord vooraf

Samenvatting

In deze bachelorproef worden de moderne veiligheidsrisico's geanalyseerd die gepaard gaan met container virtualisatie en container orkestratie. Hierbij zal specifiek gekeken worden naar de grootste veiligheidsrisico's, welke effecten deze kunnen hebben op een productieomgeving en hoe deze vermeden kunnen worden. Tevens zal onderzocht worden welke *security tools* (zoals *Project Calico* en *Kube-hunter*) er bestaan en hoe deze ingezet kunnen worden bij het beveiligen van een container cluster. De laatste jaren is het gebruik van containers in de *Information technology* (IT) infrastructuur fors gestegen en dit zal zo blijven evolueren in de komende jaren. Aan alle technologieën zijn nu eenmaal veiligheidsrisico's verbonden, container orkestratie vormt hier geen uitzondering op de regel. In voorgaand onderzoek werd er reeds gefocust op de grootste veiligheidsrisico's desondanks is er zeer weinig ingegaan op de effecten bij het toepassen van *best practices*. Met deze paper tracht ik het gebruik en de daaraan verbonden risico's van container virtualisatie en container orkestratie te onderzoeken. Daarnaast zal er ook gekeken worden naar hoe de verschillende *security tools* kunnen helpen bij het beveiligen van containers. Ten slotte wordt er onderzocht hoe deze risico's vermeden of opgelost kunnen worden en welk effecten ze hebben op de relevante criteria. Dit laatste zal via een *proof-of-concept* opstelling gebeuren.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	15
1.1	Probleemstelling	16
1.2	Onderzoeksvraag	16
1.3	Onderzoeksdoelstelling	16
1.4	Opzet van deze bachelorproef	16
2	Stand van zaken	19
2.1	Containers	19
2.1.1	Container vs. virtuele machine	20
2.1.2	Waarvoor worden containers gebruikt	21
2.2	Docker	21
2.2.1	Hoe werkt docker	22
2.2.2	Docker componenten en terminologie	22

2.3	Container orkestratie	23
2.3.1	Container orkestratie tools	24
2.4	Kubernetes	24
2.5	Security	27
2.5.1	Meest voorkomende security problemen	27
2.5.2	Hoe een container cluster beveiligen	27
2.6	Security tools	29
2.6.1	Project Calico	29
2.6.2	Kube-Bench	30
2.6.3	Kube-hunter	30
3	Methodologie	33
3.1	Opzetten van de Kubernetes cluster	34
3.1.1	Linode Kubernetes cluster	34
3.1.2	Gegevens- verzameling en verwerking	36
3.2	Scenario 1: Cluster opstelling zonder oog voor security	38
3.3	Scenario 2: Cluster opstelling met gebruik van best practices	39
3.4	Scenario 3: Cluster opstelling met security tools	40
4	Conclusie	41
A	Onderzoeksvoorstel	43
A.1	Inleiding en State-of-the-art	43
A.1.1	Wat zijn containers?	43
A.1.2	Waarom container applicaties?	44
A.1.3	Context voor dit onderzoek	44

A.1.4	Verloop van het onderzoek	44
A.2	Methodologie	44
A.3	Verwachte resultaten	45
A.4	Verwachte conclusies	45
A.5	Bijlagen	45
	Bibliografie	47

Lijst van figuren

2.1	Type 1 & Type 2 Hypervisor (VMWare, 2021)	20
2.2	Container vs. virtuele machine (Google, 2016)	21
2.3	Kubernetes cluster componenten (Docker, 2021a)	22
2.4	Kubernetes cluster componenten (Kubernetes, 2021)	25
2.5	Platformen die ondersteunt worden door Calico (Tigera, 2021)	30
3.1	Aanmaken Linode cluster	35
3.2	Toevoegen van nodes aan cluster	36
3.3	kubeconfig.yaml	37
A.1	Verwachte opstart tijd	46
A.2	Verwacht resource gebruik	46

Lijst van tabellen

1. Inleiding

Tijdens de ontwikkeling van traditionele applicaties wordt de applicatie uitgewerkt in een specifieke testomgeving. Bij het overzetten van de applicatie van de test- naar de productieomgeving (i.e., van een Linux testomgeving naar een Windows productieomgeving), komen er vaak problemen naar boven). Deze problemen kunnen vermeden worden door gebruik te maken van containers en vergemakkelijken daarbij het uitrollen en schalen.

Een container is een pakket waar één enkele applicatie in zit, samen met alle nodige afhankelijkheden (Education, 2019). Dit zorgt ervoor dat deze gemakkelijk en snel van de ene omgeving naar de andere kan overgezet worden.

Naarmate het gebruik van containers steeg, steeg ook de nood om deze vanuit één centrale locatie te beheren. Om aan deze vraag te voldoen werden container orkestratie tools, zoals Kubernetes¹, ontwikkeld. Deze tools helpen bij het opzetten, uitbreiden en verbinden van een grote hoeveelheid containers.

In deze bachelorproef worden de moderne veiligheidsrisico's geanalyseerd die gepaard gaan met container virtualisatie en container orkestratie. Hierbij zal specifiek gekeken worden naar de grootste veiligheidsrisico's, welke effecten deze kunnen hebben op een productieomgeving en hoe deze vermeden kunnen worden.

Aan alle technologieën zijn nu eenmaal veiligheidsrisico's verbonden, container virtualisatie en container orkestratie vormen hier geen uitzondering op de regel. Een groot onderdeel van container security zijn de zogenaamde *security tools* (zoals *Project Calico* en *Kube-hunter*).

¹<https://kubernetes.io/>

In voorgaand onderzoek werd er reeds gefocust op de grootste veiligheidsrisico's desondanks is er zeer weinig ingegaan op de effecten bij het toepassen van *best practices* en het gebruik van *security tools*. Met deze paper tracht ik het gebruik, en de daaraan verbonden risico's, van container virtualisatie en container orkestratie te onderzoeken. Daarnaast zal er ook gekeken worden naar hoe de verschillende *security tools* kunnen helpen bij het beveiligen van containers.

Ten slotte wordt er onderzocht hoe deze risico's vermeden of opgelost kunnen worden en welk effecten ze hebben op de relevante criteria. Dit laatste zal via een [proof-of-concept] opstelling gebeuren.

1.1 Probleemstelling

De probleemstelling houdt in dat veel bedrijven gebruik maken van containers en container orkestratie zonder hierbij al te veel aandacht te besteden aan de beveiliging hiervan. Daarnaast dient er gekeken te worden naar wat voor effecten de beveiliging van een container omgeving met zich mee brengt en hoe men best te werk gaat.

1.2 Onderzoeksvraag

Wat zijn de belangrijkste security risico's? Welke *security tools* zijn er en hoe werken ze? Welke impact hebben [best practices] en *security tools* op criteria?

1.3 Onderzoeksdoelstelling

Het doel van deze bachelorproef is hoofdzakelijk om tot een verslag te komen met daarin aanbevelingen omtrent het beveiligen van een container cluster. Deze aanbevelingen zullen gestaafd worden door enkele scenarios en hun effect op enkele criteria.

1.4 Opzet van deze bachelorproef

De rest van deze bachelorproef is als volgt opgebouwd:

In Hoofdstuk 2 wordt een overzicht gegeven van de stand van zaken binnen het onderzoeksdomein, op basis van een literatuurstudie.

In Hoofdstuk 3 wordt de methodologie toegelicht en worden de gebruikte onderzoekstechnieken besproken om een antwoord te kunnen formuleren op de onderzoeksvragen.

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.

2. Stand van zaken

De stand van zaken of *State of the art* geeft een algemeen beeld weer van de technologieën die worden overwogen in dit onderzoek en tevens de verschillende manieren van toepassing.

2.1 Containers

In dit hoofdstuk zal uitgelegd worden wat containers zijn, hoe ze werken en waarvoor ze worden gebruikt.

Containers bieden veel voordelen vergeleken met normale virtuele machines (VM's). Ze kunnen snel opgezet worden en zijn gemakkelijk om te configureren terwijl virtuele machines vaak groot en traag zijn. Containers zijn pakketten waarin een applicatie vervat zit, samen met zijn benodigde bibliotheken en afhankelijkheden. Hierdoor kunnen ze vlot van de ene omgeving naar de andere worden overgezet zonder dat er extra configuratie nodig is (Education, 2019). Containers maken gebruik van besturingssysteem-virtualisatie om processen te isoleren van het *host* besturingssysteem. Daarnaast controleert het tevens de CPU gebruik en hoeveelheid RAM geheugen van deze processen (Docker, 2018).

Containers hebben eigenlijk geen eigen besturingssysteem nodig, alle containers delen 1 gezamenlijke *runtime engine*. Een *runtime engine* is de laag die verantwoordelijk is voor de communicatie tussen het besturingssysteem van de host machine en de containers zelf. De meeste gebruikte runtime engine is de *Docker Engine*¹.

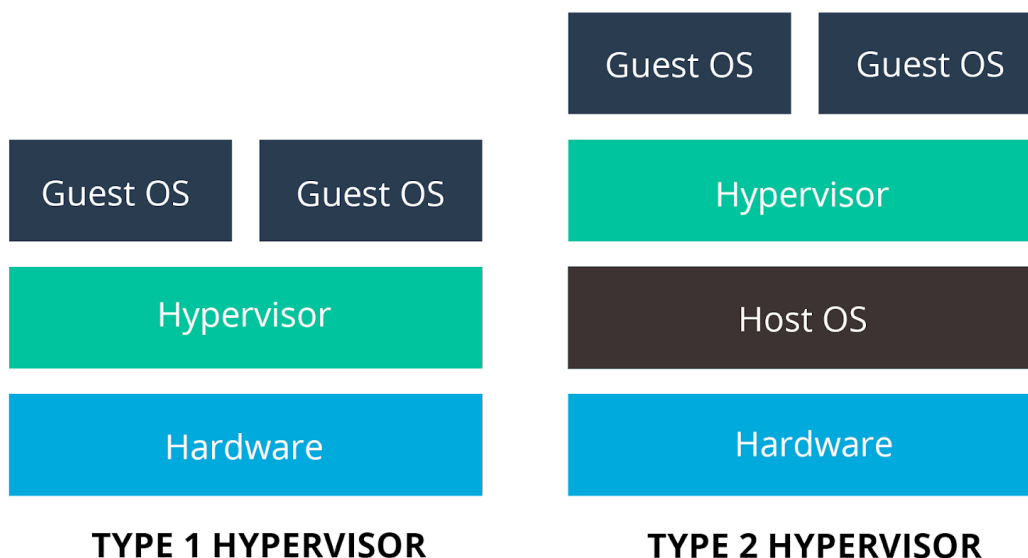
¹docs.docker.com/engine/

2.1.1 Container vs. virtuele machine

Hypervisors

Bij traditionele virtuele machines virtualiseert een *hypervisor* de fysieke hardware. De hypervisor regelt het resource gebruik tussen de verschillende VM's en zorgt ervoor dat de hardware van de host (de fysieke hardware waar de hypervisor op geïnstalleerd is) eerlijk verdeelt wordt. Er zijn 2 types hypervisor (VMWare, 2021), namelijk:

- Type 1: Ook wel *bare metal* hypervisors genoemd. Deze werken rechtstreeks op de fysieke hardware van de host en hebben dus geen onderliggend besturingssysteem nodig. Door het rechtstreekse contact tussen de hypervisor en de hardware wordt een type 1 hypervisor beschouwd als de best presterende en meest efficiënte hypervisor. Een type 1 hypervisor wordt ook beschouwd als het veiligste van de 2, dit omdat de gebreken en kwetsbaarheden die doorgaans in besturingssystemen aanwezig zijn hier onmogelijk zijn.
- Type 2: Ook wel *hosted* hypervisors genoemd. Deze worden doorgaans geïnstalleerd op een bestaand besturingssysteem en steunt daar ook op voor het beheren van de resources. Een groot voordeel van type 2 hypervisors is dat ze een breed gamma aan hardware ondersteunen.

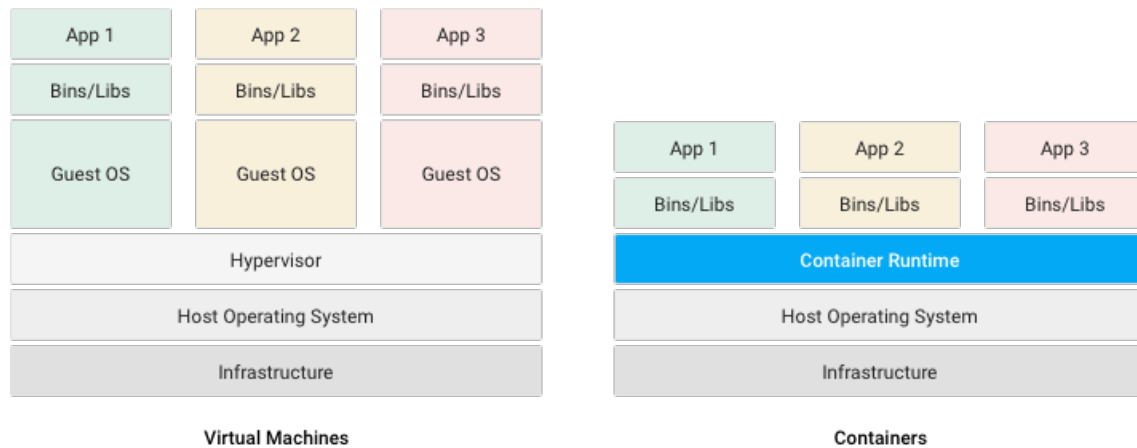


Figuur 2.1: Type 1 & Type 2 Hypervisor (VMWare, 2021)

Tegenwoordig worden type 1 hypervisors in productieomgevingen het meest gebruikt, dit vanwege hun efficiënte resource gebruik en veiligheid. Type 2 hypervisors worden meer gebruikt in testomgevingen omdat deze gemakkelijker op zetten zijn.

Elke Vm heeft zijn eigen volwaardig besturingssystemen, met gevolg dat deze veel resources gebruiken en hierbij vaak trager zijn. In plaats van de onderliggende hardware

te visualiseren gebruiken containers het besturingssysteem (meestal is dit Linux) zelf, zo bevat elke individuele container enkel de applicatie en de bijhorende bibliotheken en afhankelijkheden bevat (Education, 2020).



Figuur 2.2: Container vs. virtuele machine (Google, 2016)

2.1.2 Waarvoor worden containers gebruikt

Containers zijn zeer veelzijdig en kunnen dus in veel verschillende omstandigheden gebruikt worden. Enkele *use cases* waarvoor containers zeer geschikt zijn (Docker, 2021b):

- **Microservices:** Containers zijn klein en licht, waardoor ze goed passen bij microservice-architecturen waarin applicaties zijn opgebouwd uit vele, losjes gekoppelde en onafhankelijk services.
- **Modernisering en migratie van applicaties:** Een van de meest voorkomende benaderingen voor het moderniseren van applicaties begint met het containeriseren ervan, zodat ze naar de *cloud* kunnen worden gemigreerd.
- **Nieuwe ontwikkelaars snel inwerken:** Door gebruik te maken van containers verloopt het opzetten van een nieuwe lokale ontwikkelingsomgeving snel en vlot, hierdoor kunnen de ontwikkelaars direct aan de slag.

2.2 Docker

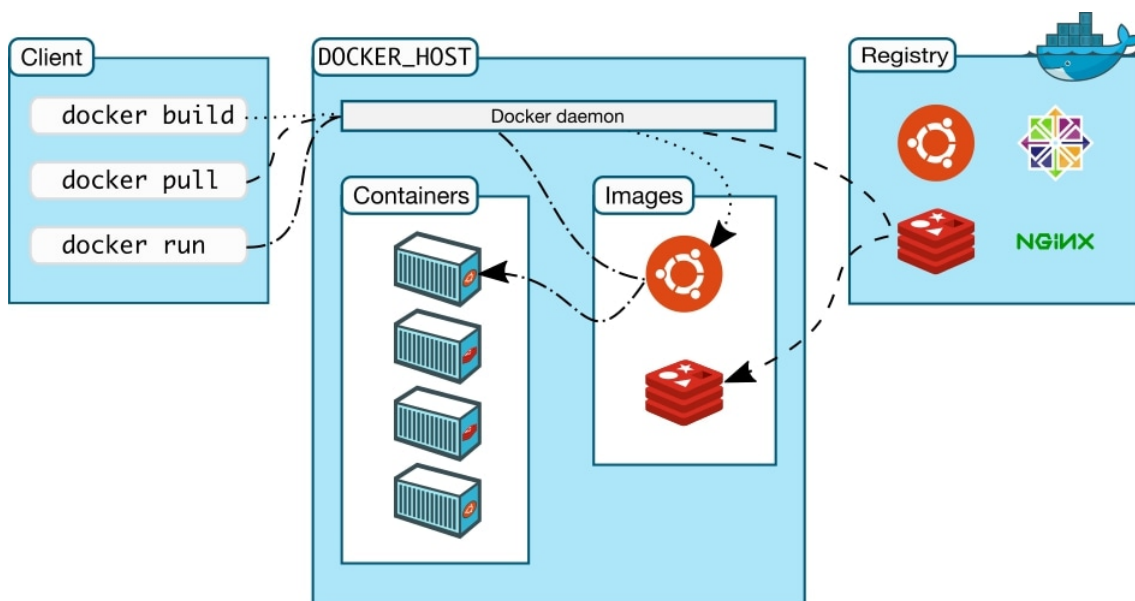
*Docker*² is een open source container platform dat sinds de release in 2013 ongeloofelijk populair is geworden. In november 2019 stond de teller van aantal *pulls* op de *Docker hub* op 130 miljard, in juli 2020 stond deze al op 242 miljard. Dat is bijna een verdubbeling op minder dan 8 maand tijd (Kreisa, 2020). Docker-containers kunnen overal draaien, in het datacenter, bij een externe serviceprovider of in de cloud. Docker containers kunnen zowel op Linux als op Windows draaien. Containers die op Windows gebaseerd zijn kunnen

²docker.com/

echter alleen op Windows systemen draaien, maar Linux containers kunnen op zowel Linux systemen en Windows systemen draaien (met behulp van een Linux VM). Dit komt omdat containers ontworpen zijn om het besturingssysteem van de host te gebruiken (Anil e.a., 2018).

2.2.1 Hoe werkt docker

Docker gebruikt een *Client-Server* architectuur. Deze werkt als volgt: De Docker *Client* communiceert met de Docker *Daemon* (een proces dat op de achtergrond draait en bepaalde (onderhouds-)taken uitvoert). Deze is verantwoordelijk voor het bouwen, runnen en verspreiden van containers (Docker, 2021a).



Figuur 2.3: Kubernetes cluster componenten (Docker, 2021a)

2.2.2 Docker componenten en terminologie

Docker Daemon

De Docker Daemon (dockerd) luistert naar Docker Application programming interface (API) verzoeken en beheert Docker objecten waaronder *images*, *containers*, netwerken, en *volumes*.

Docker Client

De Docker Client is de meest gebruikte manier voor gebruikers om te communiceren met Docker. De client stuurt alle ingevoerde commando's (zoals `docker pull` en `docker run`) door naar de Docker Daemon die deze uitvoert.

Docker registries

Een *Docker register* is een bibliotheek die *Docker images* opslaat. Het standaard register voor Docker is de *Docker Hub*³. Als de Docker daemon geen lokale Docker image vindt gaat deze standaard in de *Docker Hub* zoeken. Wanneer gebruik gemaakt wordt van de `docker pull` of `docker run` commando's wordt gebruikt, worden de benodigde images uit het register gehaald.

Docker objecten

Docker maakt gebruik van images, volumes en netwerken, al deze onderdelen worden objecten genoemd. Volgens Docker (2021a) zijn dit de belangrijkste objecten:

- **Images:** Docker images zijn *read-only* sjablonen met instructies om een Docker container op te zetten. Docker images kunnen uit de Docker hub gehaald worden en direct gebruikt worden zonder verdere configuratie. Verder kan je tevens bijkomende instructies toevoegen aan de *base image* en deze opslaan als een nieuwe en aangepaste Docker image. Een Docker image is vaak gebaseerd op een andere images (i.e., Een nieuwe image kan gebaseerd zijn op een bestaande *Ubuntu* image maar installeert en configureert daarbij een *Apache* webserver). Alsook is het mogelijk om zelf een compleet nieuwe image te maken met behulp van een *dockerfile*.
- **Containers:** Een container is een uitvoerbare instantie van een image die wordt gecontroleerd via de Docker API. Een container kan verbonden worden met andere containers, aan externe opslag of gebruikt worden als basis voor nieuwe image.
- **Volumes:** De persistente gegevens die Docker containers kunnen gebruiken wordt opgeslagen in zogenaamde volumes. Deze volumes worden volledig gecontroleerd via de Docker API en bevinden zich buiten de container zelf. Hierdoor blijft het gewicht van de containers laag en kan de data blijven bestaan ook al wordt de container gestopt of verwijderd.

2.3 Container orkestratie

Container orkestratie helpt bij het opzetten, beheren, schalen en verbinden van een grote hoeveelheid containers. Container orkestratie helpt dus om complexe procedures te vereenvoudigen. Dit door veelvoorkomende processen en werkstromen te stroomlijnen en te optimaliseren. Een ander belangrijk onderdeel van orkestratie is het geautomatiseerd onderhoud van de applicaties die in de containers draaien (RedHat, 2021b).

Waarvoor word container orkestratie gebruikt?

Container orkestratie wordt vooral gebruikt voor het automatiseren en beheren van de configuratie en uitrol, het toewijzen van resources, de *Load balancing* en het monitoren van containers.

³hub.docker.com/

2.3.1 Container orkestratie tools

Om aan container orkestratie te gaan doen zijn er natuurlijk tools nodig die ons alle nodig functionaliteiten kunnen aanbieden. DevopsCube (2021) geeft een overzicht van de meest prominente orkestratie tools.

Kubernetes

Kubernetes(K8s)⁴ is een open-source, container cluster manager en orkestratie tool. Het is gebouwd met een uitstekende resource manager voor het inzetten van containers op een efficiëntere manier. Kubernetes is voor vele organisaties de “de facto” container orkestratie tool geworden voor veel organisaties. Volgens CNCF (2021) zijn er meer dan 109 tools om containers te beheren, maar 89% is gebouwd met K8s aan de basis.

Openshift

Openshift behoort tot de 89% tools die gebouwd zijn bovenop Kubernetes. Het Openshift-project⁵ wordt onderhouden door RedHat⁶. Het heeft zowel een open source versie (*openshift origin*⁷) als een enterprise versie (*openshift container platform*⁸).

Hasicorp Nomad

Nomad⁹ is een orkestratieplatform van Hashicorp¹⁰ dat containers op schaal kan ondersteunen. Op het vlak van applicatiemanagement is het zeer sterk vergelijkbaar met Kubernetes. Echter kan Nomad ook niet-containerapplicaties kan beheren, met gevolg dat deze zich kan distantiëren van de andere orkestratie tools. Daarnaast kan Nomad feilloos geïntegreerd worden met andere tools van Hashicorp.

2.4 Kubernetes

Hier wordt ingegaan op wat Kubernetes(K8s) en hoe het werkt. Daarnaast worden de verschillende technische termen die eigen zijn aan K8s uitgelegd.

Kubernetes is een open-source, container cluster manager en orkestratie tool. Het werd ontwikkeld door Google om hun container applicaties op grote schaal te kunnen orkestreren. Het project werd in 2014 *open-source* gemaakt, dat wil zeggen dat Google niet meer rechtstreeks de eigenaar is maar dat het project verder ontwikkeld wordt door vrijwilligers.

⁴kubernetes.io/

⁵openshift.com/

⁶redhat.com/

⁷github.com/openshift/origin

⁸openshift.com/products/container-platform

⁹nomadproject.io/

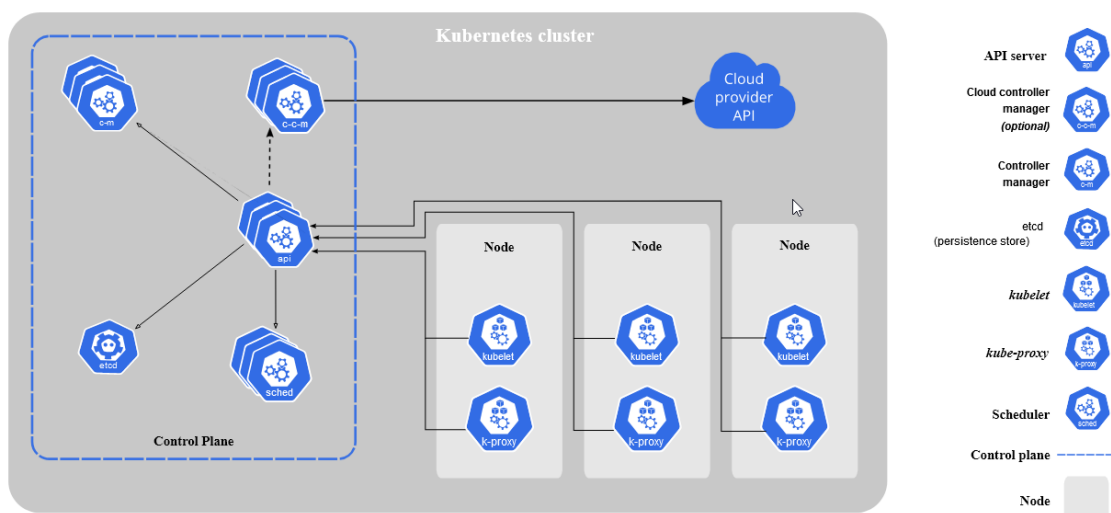
¹⁰hashicorp.com/

Hierdoor konden ook andere organisaties niet alleen gebruik maken van deze krachtige tool, maar tevens meewerken aan de ontwikkeling ervan. De term *Kubernetes* is Grieks voor “stuurman van een schip” (Kubernetes, 2021). Enkele diensten die door K8s aangeboden worden:

- Automatisch load-balancing op basis van de hoeveelheid verkeer.
- Opslag orkestratie: Het automatisch *mounten* van verschillende types opslag (lokale- of cloud opslag).
- Resource controle: K8s zorgt ervoor dat de beschikbare resources correct en efficiënt verdeeld worden.
- *Self-healing*: K8s kan containers heropstarten, vervangen of stopzetten als deze niet meer voldoende correct werken.

Kubernetes componenten en terminologie

Zoals beschreven in de documentatie van Pedersen e.a. (2021) en RedHat (2021a) worden Kubernetes en de bijhorende componenten als volgt gedefinieerd: Kubernetes is een *cluster* bestaande uit 2 grote delen namelijk het *control plane* en de *nodes*. Deze nodes zijn de door K8s georkestreerde containers. Elke cluster bestaat uit uit minstens één, maar meestal meerdere, nodes. De nodes worden gebruikt om *pods* te hosten. Pods zijn de kleinst mogelijke eenheid in een K8s systeem. Een pod bestaat uit één of meerdere containers die opslag- en netwerk resources delen (RedHat, 2021a). In Figuur 2.4 worden de verschillende componenten van een K8s cluster gevisualiseerd.



Figuur 2.4: Kubernetes cluster componenten (Kubernetes, 2021)

Het hart van een K8s cluster is de **Control plane**, hierin bevinden zich alle componenten die de cluster controleren. Tevens zitten alle gegevens omtrent de staat van de cluster en de configuratie hierin verbonden. Alle componenten die deel uitmaken van de *Control plane* kunnen op verschillende machines draaien. Hierbij wordt er wel aangeraden om

deze binnen eenzelfde machine te houden. De verschillende onderdelen en hun plaats binnen een cluster worden hieronder besproken.

De **kube-apiserver** wordt gezien als de *Front-end* van een Kubernetes cluster. Deze is de link tussen *nodes* en *Pods* van de cluster en de *Control plane*. Het doel van deze apiserver is om de communicatie van de nodes en de Kubernetes API te bolwerken. De apiserver is ontworpen om horizontaal te schalen als deze te zwaar belast wordt. Hierbij creëert die nieuwe instanties van zichzelf.

Alle data en informatie met betrekking tot de status van de cluster wordt opgeslagen in **etcd**, een *key-value store database*.

De **kube-scheduler** is verantwoordelijk voor het toekennen van pods aan nodes en voor het verdelen van de resources tussen de verschillende Nodes. Het toekennen van een Node aan een Pod gebeurt aan de hand van verschillende factoren. De mogelijke factoren zijn onder andere de benodigde resources van een Pod en eventuele hardware- en software beperkingen.

Een **kube-controller-manager** bestaat uit verschillende *controllers* die allemaal een verschillende taak op zich nemen. Enkele van deze *controllers* zijn:

- *Node controller*: Het hoofddoel van deze controller is om op te merken en reageren als er Pods zouden wegvallen.
- *Job controller*: Deze zoekt naar zogenaamde *job-objecten*, die eenmalige taken voorstellen, en creëert bijgevolg de nodige Pods om deze taken uit te voeren.
- *Service Account & Token controllers*: Deze creëert standaard accounts en *API access tokens* voor nieuwe Pods.

Als het *Control plane* het hart van een K8s cluster is dan kunnen we de *Nodes* het lichaam noemen. Deze doen namelijk al het zware werk en worden bestuurd door de *Control plane*.

Het eerste onderdeel van een Node is de **kubelet**, een kleine applicatie die op elke Node aanwezig is. De **kubelet** houdt de gezondheid en status van de Pods, die binnen zijn Node draaien, in het oog. Wanneer de *Control plane* wil dat er iets gebeurt met de Node zorgt de **kubelet** ervoor dat deze acties correct uitgevoerd worden.

De **kube-proxy** is een netwerk *proxy* die de verantwoordelijk is voor de K8s *networkservices*. De **kube-proxy** verzorgt netwerkcommunicatie zowel binnen- als buiten de cluster.

Het volgende component, namelijk de **Container runtime**, werd al reeds besproken in sectie 2.1.

Ten slotte zijn er nog enkele extra *addons* die gebruikt kunnen worden om de functionaliteit van een K8s cluster uit te breiden. Een eerste voorbeeld van een *addon* is de mogelijkheid om persistent geheugen (ook wel *volumes* genoemd) toe te voegen zoals uitgelegd in sectie 2.2.2. Andere voorbeelden zijn het toevoegen van een **cluster DNS**, **Web UI** of **Dashboard** en het opslaan van de log bestanden van de cluster met **cluster-level logging**.

2.5 Security

Hier zal het *security* aspect van containers en container orkestratie besproken worden. In dit hoofdstuk tracht ik antwoord te geven op de onderzoeksvragen “Wat zijn de belangrijkste security risico’s?” en “Welke *security tools* zijn er en hoe werken ze?”.

Uit een rapport van Tripwire (2019) blijkt dat 94% van bevroagden bezorgd zijn over de veiligheid van hun containers. Uit hetzelfde rapport blijkt ook dat 47% zich bewust is van feit dat ze mogelijks kwetsbare containers gebruiken in hun productieomgeving. Het beveiligen van een K8s cluster is dan ook een zeer grote en complexe taak. Dit is omdat er veel verschillende onderdelen zijn die allemaal andere veiligheidsproblemen met zich mee kunnen meebrengen. Vanwege de hoeveelheid tijd en middelen die er nodig zijn voor het implementeren van goede veiligheidsmaatregelen wordt het door veel bedrijven gezien als een *nice to have* in plaats van een *need to have*.

2.5.1 Meest voorkomende security problemen

Een van de meest voorkomende veiligheidsproblemen bij het opzetten van een K8s cluster is het fout, of zelf helemaal niet, definiëren van parameters. Dit kan er mogelijks voor zorgen dat een aanvaller kan ‘ontsnappen’ uit een container (lees toegang krijgen tot het host systeem). Ook het gebruik van ongecontroleerd Docker images kan ervoor zorgen dat een cluster van binnenuit gecompromeerd kan worden.

Een ander probleem zijn de onvermijdelijk *bugs* in K8s zelf. Deze is tevens wel een van de gemakkelijkste veiligheidsproblemen om op te lossen, namelijk door altijd de laatste versie van Kubernetes te installeren. Als er een *bug* of kwetsbaarheid wordt ontdekt, wordt deze in de meeste gevallen binnen enkele dagen weggewerkt door het K8s security team.

2.5.2 Hoe een container cluster beveiligen

Hieronder zullen er enkele mogelijke manieren om een container cluster te beveiligen besproken worden.

Lewis (2019) en Rice (2019) geven enkele tips voor het veilig opzetten van een K8s cluster. Ten eerste wordt het gebruik van *Role Based Access Control* (RBAC) stevig aangemoedigd. Door hiervan gebruik te maken, is het mogelijk om rollen toe te kennen aan bepaalde gebruikers. Deze rollen dicteren welke applicaties de gebruiker kan gebruiken en wat die ermee kan doen.

Vervolgens wordt er aangeraden om nooit de administrator (ook wel *root* genoemd) rechten te gebruiken, enkel als het nodig is voor de specifieke applicatie (i.e, *KubeDNS*). Dit kan ervoor zorgen dat wanneer een aanvaller controle krijgt over de cluster, hij nog steeds gelimiteerd is door de restricties die aan gewone accounts worden toegekend met RBAC. Men kan tevens beter de anonieme toegang tot de API ontzeggen en vervangen door een gecontroleerde toegang met RBAC.

Het gebruiken van een normaal gebruikers account kan ook afgedwongen worden door gebruik te maken van een bepaalde *Security Policies* parameter, namelijk `RunAsUser`. Dit wordt geïllustreerd in voorbeeld 2.5.2. Een *Security Policy* controleert de meer veiligheidsgevoelige aspecten van een cluster. Zo kan via de `seLinux` policy het gebruik van SELinux afgedwongen worden. De `volumes` policy geeft dan weer controle over de soorten volumes die gebruikt kunnen worden.

```
apiVersion: v1
kind: Pod
metadata:
  name: Example
spec:
  securityContext:
    runAsUser: 1000
```

De communicatie tussen de Pods kan gecontroleerd worden aan de hand van zogenaamde *Network policies*. Dit zijn regels die aanduiden welke pods met elkaar kunnen communiceren en welke soort data er uitgewisseld kan worden. In voorbeeld 2.5.2 wordt inkomend verkeer naar pods met label “color: blue” alleen toegestaan als het afkomstig is van een pod met label “color: red” en dit enkel op poort 80. De *Network policies* kunnen handmatig worden geconfigureerd of er kan gebruik gemaakt worden van een zogenaamde *Container Network Interface* (CNI). Een CNI helpt met het configureren en onderhouden van de *Network policies*. In sectie 2.6.1 wordt één van de meest prominente CNI’s besproken, namelijk *Project Calico*.

```
kind: NetworkPolicy
apiVersion: networking.k8s.io/v1
metadata:
  name: allow-same-namespace
  namespace: default
spec:
  podSelector:
    matchLabels:
      color: blue
  ingress:
    - from:
      - podSelector:
          matchLabels:
            color: red
      ports:
        - port: 80
```

Fouten maken is menselijk, dus het is perfect mogelijk dat er tijdens het opstellen van de configuratie files enkele fouten insluipen. Daarom wordt het aangeraden om automatische *configuration checks* uit te voeren zodat deze fouten vroegtijdig opgemerkt kunnen worden.

Een tool die hiervoor vaak gebruikt wordt, namelijk **kube-bench**, wordt besproken in sectie 2.6.2.

Het spreekwoord ‘De ketting is maar zo sterk als zijn zwakste schakel’ is ook hier van toepassing. De cluster kan ongelooflijk zwaar beveiligd zijn, maar als er gebruik wordt gemaakt van onveilige containers is al die moeite voor niets geweest.

Volgens Lewis (2019) zijn er verschillende manieren om ervoor te zorgen dat er enkel veilige containers gebruikt worden. De eerste is het gebruik maken van zogenaamde *trusted base images*. Dit zijn containers die volledig ontwikkeld zijn door het bedrijf dat ze in gebruik neemt. Het *Base* gedeelte van de naam komt van het feit dat deze containers meestal zeer simpel zijn. Zo kan elke container applicatie gebaseerd worden op dezelfde veilige container *image*. Een extra veiligheidsmaatregel die vaak aangeraden wordt is het gebruiken van een *private registry*. Wat een *registry* precies is werd al reeds verduidelijkt in sectie 2.2.2. Een *private registry* is niets anders dan een *registry* die volledig door het bedrijf wordt gecontroleerd en enkel door hen wordt gebruikt. Zij kiezen zelf welke *images* er wel of niet worden toegevoegd. Hierdoor vermijdt men dat er per ongeluk een onveilige container wordt gebruikt binnen een cluster.

Spijtig genoeg is niet iedereen die met container clusters werkt even bezorgd over de veiligheid ervan. Om het gebruik van onveilige Pods te vermijden kan men een *policy agent* gebruiken. Hiermee kan er automatisch gecontroleerd worden of de Pods aan alle veiligheidsvoorschriften voldoen, alvorens ze in gebruik te nemen. Een voorbeeld van een *policy agent* is de **Open Policy Agent**¹¹, ontwikkeld door de *text Cloud Native Computing Foundation (CNCF)*¹².

2.6 Security tools

In dit hoofdstuk zal ik trachten te antwoorden op de onderzoeksvraag “Welke security tools zijn er?”

Een andere manier om een K8s cluster verder te beveiligen is door gebruik te maken van *Security tools*. Taylor (2019) geeft een overzicht met de meest prominente tools.

2.6.1 Project Calico

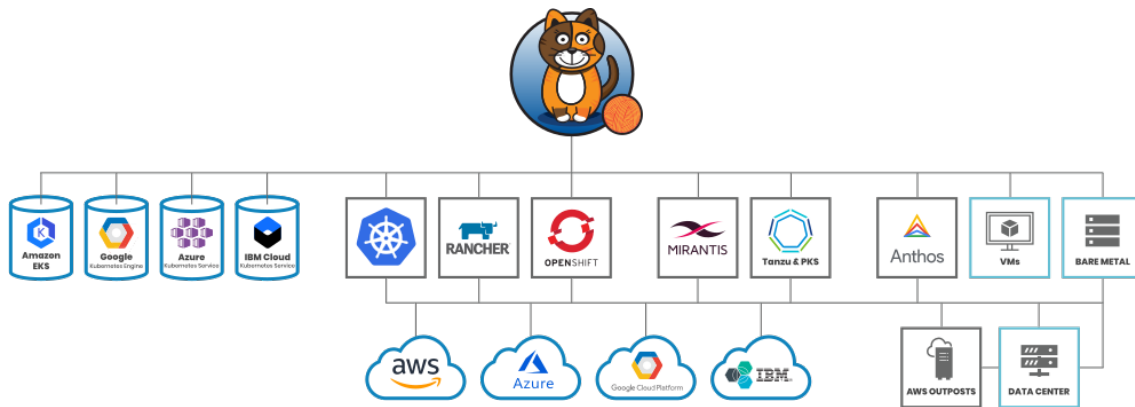
Project Calico¹³ is volledig *open source* en volgens Armstrong (2021) de meeste gebruikte security tool voor K8s. Calico is niet enkel een K8s security tool maar is tevens volledig geïntegreerd met vele andere platformen. Figuur 2.5 geeft een overzicht van de door Calico ondersteunde platformen. Project Calico creert een soort van *microfirewall* rond elke service. De policies die ingesteld kunnen worden in Calico worden automatisch omgezet

¹¹openpolicyagent.org/

¹²cncf.io/

¹³projectcalico.org/

naar firewall regels. Deze worden vervolgens toegepast op elke service. Calico heeft zich onlangs aangesloten bij de Cloud Native Computing Foundation, waardoor het onder deskundig toezicht staat en nog beter geïntegreerd is in het Kubernetes ecosysteem.



Figuur 2.5: Platformen die ondersteund worden door Calico (Tigera, 2021)

2.6.2 Kube-Bench

Kube-Bench¹⁴ is een *open-source* applicatie geschreven in *Go*¹⁵ die controleert of k8s veilig is geïmplementeerd door middel van controles uit te voeren op de cluster. De controles zijn gebaseerd op enkele guidelines die het *Center for Internet Security*¹⁶ (CIS), een organisatie die richtlijnen opmaakt voor het schrijven van veilige code, heeft opgesteld. De zogenaamde *CIS Kubernetes Benchmarks* worden geschreven door de Kubernetes *community* en worden door de CIS gecontroleerd en gebundeld. *Kube-Bench* controleert niet alleen of er fouten in de beveiliging van een cluster zitten, het geeft ook mogelijke oplossingen. Mogelijke controles zijn het controleren van gebruikersautorisatie- en -authenticatie, de versleuteling van gegevens en kijken of de cluster het principe van *least privilege* volgt (een gebruiker krijgt enkel toegang tot gegevens die hij echt nodig heeft). De testen worden gedefinieerd in een 'YAML Ain't Markup Language' (YAML) bestand zodat ze gemakkelijk aangepast en uitgebreid kunnen worden (Rice e.a., 2021). De testen worden uitgevoerd op elke individuele node in de cluster waardoor het vooral geschikt is voor kleinere opstellingen.

2.6.3 Kube-hunter

Kube-hunter¹⁷ is, net zoals *Kube-Bench*, een open-source applicatie gemaakt is door *Aqua Security*¹⁸. *Kube-hunter* breidt de functionaliteiten van *Kube-Bench* uit door penetratie

¹⁴github.com/aquasecurity/kube-bench

¹⁵golang.org/

¹⁶cisecurity.org/benchmark/kubernetes/

¹⁷github.com/aquasecurity/kube-hunter

¹⁸aquasec.com/

testen uit te voeren op de cluster. Dit zorgt ervoor dat administrators problemen met een cluster gemakkelijk kunnen opsporen en verhelpen.

Er zijn drie verschillende manieren om *kube-hunter* te gebruiken. De eerste maakt gebruik van het ip-adres van de cluster om vanop afstand de testen uit te voeren. Bij de tweede manier wordt *kube-hunter* lokaal op één van de machines in de cluster geïnstalleerd om die netwerkinterfaces van die specifieke machine te testen. De derde en laatste manier om *kube-hunter* te gebruiken is om het te installeren in een Pod binnen de cluster. Deze manier kan aantonen wat voor potentiële schade er kan aangericht worden als één van de Pods gecompromitteerd zou worden.

3. Methodologie

Om het effect van zowel K8s “best-practice” als K8s security tools op een cluster te onderzoeken werd er gekozen om het onderzoek in 3 scenario’s onder te verdelen. Dit heeft als doel om gegevens over enkele criteria te verzamelen, namelijk het resource gebruik, de stabiliteit en de opstarttijd van de cluster. Voordat we aan de scenario’s beginnen zullen alle stappen die doorlopen zijn bij het opzetten van de cluster beschreven worden. Nadat de cluster opgezet is zullen we beginnen met het eerste scenario namelijk het opzetten van een basis cluster om de functionaliteit van K8s aan te tonen en om baseline gegevens te verzamelen voor het onderzoek. Deze cluster zal ook dienen om verder scenario’s uit te werken. Als tweede worden er enkele “best-practice” gehanteerd bij het opzetten en de configuratie van de cluster, dit om te onderzoeken wat voor effect deze hebben op de cluster. Ten slotte zal bij het opzetten en configureren van de cluster gebruik gemaakt worden van enkele K8s security tools om te testen wat deze precies doen en wat voor effect deze kunnen hebben op de criteria.

Gedurende dit onderzoek werd er gebruik gemaakt van de volgende hardware en software:

- Besturingssysteem: Pop!_OS 20.10 x86_64
- Host systeem: MSI GL62 7REX
- Kernel: 5.11.0-7614-generic (Linux)
- Cloud provider: Linode¹
- Nodes: 3 X Linode 2GB (1CPU core, 2GB RAM, 50GB opslag)

¹cloud.linode.com/

3.1 Opzetten van de Kubernetes cluster

In dit hoofdstuk zal de basis cluster opgezet worden. Deze manier van werken zal ook gebruikt worden om de andere scenario's uit te voeren.

Voor het opzetten van de cluster zijn maar 3 onderdelen nodig:

- Account bij een cloud provider, in dit geval Linode.
- Kubectl om de cluster besturen.
- De Docker image om een applicatie te deployen op de cluster.

Aangezien Kubectl op zowel Linux, Windows als MacOS kan draaien, en omdat de cluster zelf bij de cloud provider wordt gehost, kunnen deze scenario's op bijna elke computer worden nagebootst. De stappen in de volgende hoofdstukken worden allemaal uitgevoerd op een Linux systeem en kunnen dus verschillen op Windows of MacOS. Het is ook aangeraden om een nieuwe directory aan te maken zodat alle bestanden op eenzelfde plaats te vinden zijn.

Voor dit onderzoek zal gebruik gemaakt worden van de ingebouwde “Linode Kubernetes Engine”(LKE). Deze installeert automatisch de correcte onderdelen op de verschillende worker nodes en creëert ook een gratis master node. Hiervoor werd gekozen omdat het volledig opzetten van een K8s cluster niet binnen de scope van dit onderzoek ligt. Door gebruik te maken van de LKE kunnen we ons dus focussen op de security van de cluster.

3.1.1 Linode Kubernetes cluster

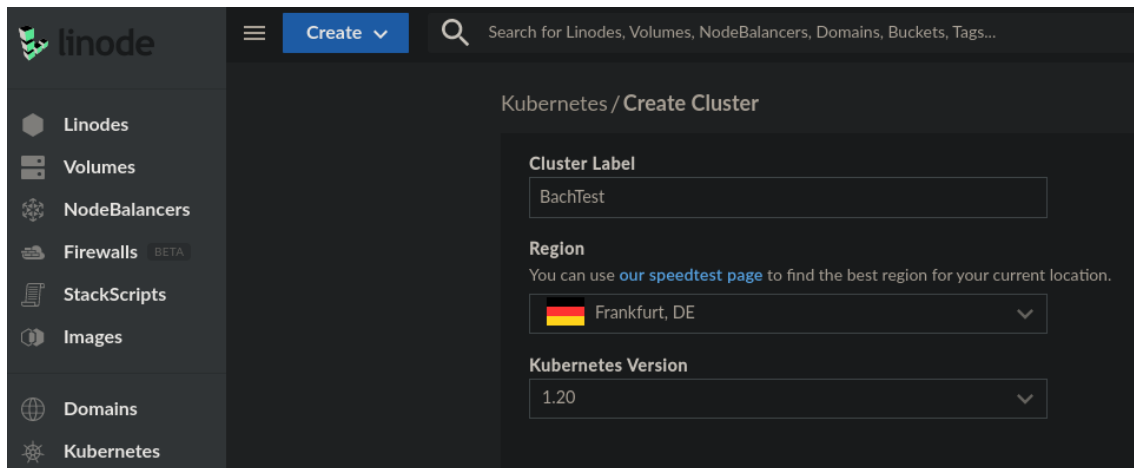
In dit hoofdstuk zullen de verschillende stappen die doorlopen zijn bij het opzetten van een Linode K8s cluster beschreven worden.

Voor het creëren van een cluster in Linode hebben we enkel een Linode account nodig, het aanmaken van de cluster zelf is zeer gemakkelijk en gebeurt via [> Kubernetes > Create Cluster](https://cloud.linode.com). Vul dan de naam, regio en versie van de cluster in zoals in figuur 3.1.

Vervolgens kunnen we nodes toevoegen aan de cluster. Voor dit onderzoek gaan we een kleinschalige cluster opzetten met 3 worker nodes en 1 master node. In figuur 3.2 zijn de verschillende soorten nodes die we kunnen toevoegen opgelijst. Tijdens deze scenario's zal gebruik gemaakt worden van 3 “Linode 2GB” nodes maar het is mogelijk om nodes van verschillende groottes in dezelfde cluster toe te voegen. De master node is niet meegerekend in deze 3 nodes maar wordt door Linode gratis aangeboden bij het opzetten van een K8s cluster.

Als alle nodes zijn toegevoegd wordt de cluster aangemaakt. Linode zal dan in de achtergrond de gekozen nodes aanmaken alsook de master node klaarmaken voor gebruik.

Eenmaal de cluster is aangemaakt en opgestart is moeten we deze nog configureren. Deze configuratie gebeurt via Kubectl in volgende stappen.



Figuur 3.1: Aanmaken Linode cluster

Als eerste moeten we het kubeconfig.yaml bestand downloaden van Linode. In dit bestand staan alle nodig details om te Kubectl te connecteren met onze cluster. De kubeconfig van onze net aangemaakte cluster ziet er uit zoals 3.1.1 (enkele waarden werden ingekort om de leesbaarheid te vergroten).

Vervolgens moet het pad naar het bestand geëxporteerd worden naar de omgevingsvariabele “KUBECONFIG” met het volgende commando:

```
$ export KUBECONFIG=<pad naar file>/kubeconfig.yaml
```

We kunnen testen of dit gelukt is door het volgende commando uit te voeren. Dit zou de 3 aangemaakte nodes in onze cluster moeten teruggeven.

```
$ kubectl get nodes
```

NAME	STATUS	ROLES	AGE	VERSION
lke25332-32960-608682818f2e	Ready	<none>	6d4h	v1.20.5
lke25332-32960-60868281f030	Ready	<none>	6d4h	v1.20.5
lke25332-32960-608682824efd	Ready	<none>	6d4h	v1.20.5

Nu Kubectl in contact staat met de “kube-apiserver” die op de master node staat, kunnen we beginnen met het configureren van onze cluster. Dit kan zowel met “ad-hoc” commando’s als met zogenaamde deployments die werken via het “principle of desired state”. In andere woorden, de deployments specificeren de verschillende aspecten van de cluster en K8s zorgt ervoor dat aan al deze specificaties wordt voldaan.

Een deployment is eigenlijk niets anders dan een YAML bestand waarin beschreven wordt hoe de cluster er moet gaan uitzien. Via het volgende commando wordt een deployment op een cluster gezet.

```
$ kubectl apply -f deployment.yaml
```

Add Node Pools
Add groups of Linodes to your cluster with a chosen size.

Shared CPU **Dedicated CPU** **High Memory**

Shared CPU instances are good for medium-duty workloads and are a good mix of performance, resources, and price.

Plan	Monthly	Hourly	RAM	CPUs	Storage				
Linode 2GB	\$10	\$0.015	2 GB	1	50 GB	–	3	+	Add
Linode 4GB	\$20	\$0.03	4 GB	2	80 GB	–	0	+	Add
Linode 8GB	\$40	\$0.06	8 GB	4	160 GB	–	0	+	Add
Linode 16GB	\$80	\$0.12	16 GB	6	320 GB	–	0	+	Add
Linode 32GB	\$160	\$0.24	32 GB	8	640 GB	–	0	+	Add
Linode 64GB	\$320	\$0.48	64 GB	16	1280 GB	–	0	+	Add
Linode 96GB	\$480	\$0.72	96 GB	20	1920 GB	–	0	+	Add
Linode 128GB	\$640	\$0.96	128 GB	24	2560 GB	–	0	+	Add
Linode 192GB	\$960	\$1.44	192 GB	32	3840 GB	–	0	+	Add

Figuur 3.2: Toevoegen van nodes aan cluster

3.1.2 Gegevens- verzameling en verwerking

- Welke data er verzameld zal worden (CPU en RAM gebruik, Boot time, stability aka spikes per time) en waarom
- Uitleg over hoe deze data zal verzameld worden(sysstat) en welke grafieken er zullen gebruikt worden om een vergelijking te kunnen maken (R code tonen).

```
apiVersion: v1
kind: Config
preferences: {}

clusters:
- cluster:
    certificate-authority-data: LS0tLS1CRUdJTiBDRVJUSUZJQ0FURS0tLS0txvd0ZURVRNQkVHQ
    server: https://e08328fb-02d7-49a6-9f12-b4bdeb98510c.eu-central-2.linode.lke.net
    name: lke25796

users:
- name: lke25796-admin
  user:
    as-user-extra: {}
    token: eyJhbGciOiJSUzI1NiIsImtpZCI6IiZ1a29MSDNqVVhXS1YyMjFNNVhJeHFjTFNXaXhwYVhN

contexts:
- context:
    cluster: lke25796
    namespace: default
    user: lke25796-admin
    name: lke25796-ctx

current-context: lke25796-ctx
```

Figuur 3.3: kubeconfig.yaml

3.2 Scenario 1: Cluster opstelling zonder oog voor security

- Basic Deployment van een statische website uitleggen aan de hand van commando's, screenshots en config files.
- Deployment YAML tonen en deels uitleggen
- Service YAML tonen en deels uitleggen
- Nodige gegevens uit de cluster halen met sysstat
- Verzamelde gegevens verwerken met RStudio en grafieken/statistieken tonen en uitleggen.

3.3 Scenario 2: Cluster opstelling met gebruik van best practices

- Basic Deployment van een statische website met best practices uitleggen aan de hand van commando's, screenshots en config files.
- Vooral RunAsUser en network policy's
- Deployment YAML tonen en best practices uitleggen
- Service YAML tonen en best practices uitleggen
- Nodige gegevens uit de cluster halen met sysstat
- Verzamelde gegevens verwerken met RStudio en grafieken/statistieken tonen en uitleggen

3.4 Scenario 3: Cluster opstelling met security tools

- Basic Deployment van een statische website met enkele security tools uitleggen aan de hand van commando's, screenshots en config files.
- Vooral Kubehunter en KubeBench uitleggen en praktisch voorstellen
- YAML files / commandos tonen en de werking uitleggen
- Deployment YAML tonen en best practices uitleggen
- Service YAML tonen en best practices uitleggen
- Nodige gegevens uit de cluster halen met sysstat
- Verzamelde gegevens verwerken met RStudio en grafieken/statistieken tonen en uitleggen

4. Conclusie

A. Onderzoeksvoorstel

Het onderwerp van deze bachelorproef is gebaseerd op een onderzoeksvoorstel dat vooraf werd beoordeeld door de promotor. Dat voorstel is opgenomen in deze bijlage.

A.1 Inleiding en State-of-the-art

A.1.1 Wat zijn containers?

Het uitrollen en schalen van applicaties wordt steeds vaker gedaan met behulp van containers. Tijdens de ontwikkeling van traditionele applicaties wordt de applicatie ontwikkeld in een specifiek testomgeving. Vervolgens wordt de applicatie overgezet naar de productieomgeving wat vaak voor problemen zorgt (bijvoorbeeld van een linux testomgeving naar een Windows productieomgeving). Een container is een pakket waar één enkele applicatie in zit, samen met alle nodige afhankelijkheden (Education, 2019). Dit zorgt ervoor dat deze gemakkelijk en snel van de ene omgeving naar de andere kan overgezet worden. De containers maken gebruik van een 'runtime engine', dit is een laag die verantwoordelijk is voor de communicatie tussen het operating system van de host machine en de containers zelf. De meeste gebruikte 'runtime engine' is de 'Docker Engine'¹. Deze is al sinds 2013 de industriestandaard als het gaat over container software (McCarty, 2018). Naarmate het gebruik van containers steeg, steeg ook de nood naar op manier om deze vanuit één centrale locatie te beheren. Om aan deze vraag te voldoen werden container orkestratie tools, zoals Kubernetes², ontwikkeld. Deze tools helpen bij het opzetten, uitbreiden en verbinden van een grote hoeveelheid containers.

¹<https://docs.docker.com/engine/>

²<https://kubernetes.io/>

A.1.2 Waarom container applicaties?

Container applicaties hebben enkele voordelen tegenover normale applicaties, ze draaien namelijk geïsoleerd van de rest van het systeem. Ze kunnen dus perfect werken zonder afhankelijk te zijn van andere containers. Dit garandeert dat als er één container aangetast is, de rest zonder interruptie kan verderwerken. De containers delen wel verschillende resources van het host systeem, wat de deur opent voor veiligheidsinbreuken tussen containers.

A.1.3 Context voor dit onderzoek

Gartner (Petty, 2019) voorspeld dat tegen 2022 maar liefst 75% van alle internationale organisaties gecontaineriseerde applicaties zullen gebruiken in hun productieomgeving. Dit zowel in lokale datacenters alsook in online cloud omgevingen. Uit een rapport van Tripwire (2019) blijkt dat 94% van bevroagden bezorgd zijn over de veiligheid van hun containers. Uit hetzelfde rapport blijkt ook dat 47% weet dat ze kwetsbare containers gebruiken in hun productieomgeving. Spijtig genoeg werd bij voorgaande onderzoeken, zoals StackRox (2020), het effect van 'security best practices en tools' op opzetsnelheid, benodigde resources en stabiliteit steeds onderbelicht.

A.1.4 Verloop van het onderzoek

In deze paper zal ik onderzoeken wat de belangrijkste bronnen van veiligheidsinbreuken zijn en hoe deze vermeden kunnen worden. Tegelijkertijd krijg ik via dit onderzoek de opportuniteit om er achter te komen of er vooral technische problemen of menselijke fouten aan de basis liggen van de veiligheidsrisico's. In de volgende paragraaf staat er beschreven hoe ik te werk zal gaan.

A.2 Methodologie

Voor dit onderzoek zullen er drie scenario's opgezet worden. Elk scenario zal verschillende keren worden uitgevoerd en voor elk criteria zal het genomen worden (eventueel rekening houdende met uitschieters). Bij elke scenario zullen er verschillende 'security best practices en tools' gebruikt worden. Deze zullen getest worden op basis van de volgende criteria:

- Deployment snelheid
- Benodigde resources
- Stabiliteit

Voorbeelden van scenario's:

- S(0): Er wordt een container applicatie opgezet in een Kubernetes cluster zonder extra security configuratie.
- S(1): Er wordt een container applicatie opgezet in een Kubernetes cluster en enkele 'best practices' worden toegepast.
- S(2): Er wordt een container applicatie opgezet in een Kubernetes cluster waar er gebruik word gemaakt van enkele 'security tools' zoals 'Project Calico' en 'Kube-hunter'.

Door gebruik te maken van deze scenario's en criteria hopen we vast te stellen dat het toepassen van 'security best practices en tools' een positieve invloed heeft op het gebruik van containers en orkestratie tools.

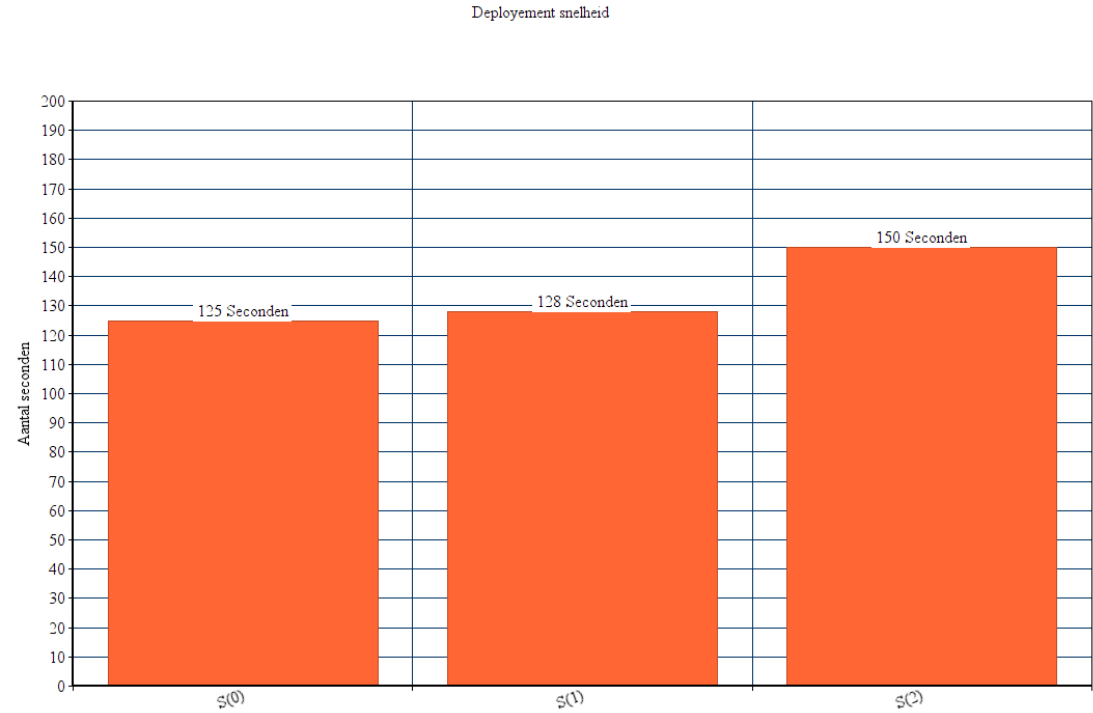
A.3 Verwachte resultaten

Op basis van de criteria wordt er verwacht dat Scenario 0 en 1 even snel op opgezet kunnen worden en evenveel resources gebruiken. Ze zullen beide kwetsbaarder zijn aangezien de 'best practices' vooral bestaan uit het correct gebruik van wachtwoorden en gebruiker privileges. Scenario 2 daarentegen zal iets meer tijd nodig hebben om opgezet te worden (zie Figuur1) en zal daarbij meer resources gebruiken (zie Figuur2). Dit zou te wijten zijn aan de gebruikte 'security tools' die extra tijd en resource nodig hebben.

A.4 Verwachte conclusies

Uit dit onderzoek willen we concluderen dat het toepassen van 'best practices' en het correct gebruik van security tools een positief effect teweeg brengt bij het gebruik van container orkestratie tools. We trachten daarnaast ook aan te duiden dat het omzeilen van security risico's een belangrijk aspect is bij het ontwikkelen van container applicaties. Tot slot kan er geconcludeerd worden dat het beveiligen van container clusters steeds belangrijker wordt. Daarnaast is het tevens van belang dat de persoon die een cluster opzet daarbij de onderliggende werkwijze goed kent en zich bewust is van de mogelijke valkuilen.

A.5 Bijlagen



Figuur A.1: Verwachte opstart tijd

Benodigde resources	CPU %	<u>Memory %</u>
S(0)	45%	30%
S(1)	46%	32%
S(2)	55%	45%

Figuur A.2: Verwacht resource gebruik

Bibliografie

- Anil, N., Coulter, D., Victor, Y., Parente, J., Warren, G. & Wenzel, M. (2018, augustus 31). *What is Docker?* Verkregen 9 maart 2021, van <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/architecture/microservices/container-docker-introduction/docker-defined>
- Armstrong, J. (2021, januari 6). *A 2020 Review of the World's Most Popular Kubernetes CNI*. <https://www.projectcalico.org/a-2020-review-of-the-worlds-most-popular-kubernetes-cni/>
- CNCF. (2021, maart 16). *CNCF Cloud Native Interactive Landscape*. <https://landscape.cncf.io/>
- DevopsCube. (2021, maart 1). *List of Best Docker Container Orchestration Tools/Services*. <https://devopscube.com/docker-container-clustering-tools/>
- Docker. (2021a, maart 5). *Docker overview*. Verkregen 9 maart 2021, van <https://docs.docker.com/get-started/overview/>
- Docker. (2021b, maart 3). *How Docker Helps Development Teams*. <https://www.docker.com/use-cases>
- Education, I. C. (2019, mei 25). *Containerization*. <https://www.ibm.com/cloud/learn/containerization#toc-what-is-co-r25Smlqq>
- Education, I. C. (2020, september 2). *Containers vs. VMs: What's the Difference?* Verkregen 8 maart 2021, van <https://www.ibm.com/cloud/blog/containers-vs-vms>
- Google. (2016). *Containers at Google: A better way to develop and deploy applications*. <https://cloud.google.com/containers>
- Kreisa, J. (2020, juli 30). *Docker Index: Dramatic Growth in Docker Usage Affirms the Continued Rising Power of Developers*. Verkregen 9 maart 2021, van <https://www.docker.com/blog/docker-index-dramatic-growth-in-docker-usage-affirms-the-continued-rising-power-of-developers/>

- Kubernetes. (2021, februari 1). *What is Kubernetes?* <https://kubernetes.io/docs/concepts/overview/what-is-kubernetes/>
- Lewis, I. Kubernetes Security Best Practices. Engles. In: KubeCon + CloudNativeCon (Kubernetes Forum Seoul, 10 december 2019). Seoul: Cloud Native Computing Foundation, 2019, december 10. Verkregen 29 maart 2021, van <https://www.youtube.com/watch?v=wqsUfvRyYpw>
- McCarty, S. (2018, februari 22). *A Practical Introduction to Container Terminology*. <https://developers.redhat.com/blog/2018/02/22/container-terminology-practical-introduction/#h.6yt1ex5wfo3l>
- Pedersen, B. E., Tokuda, T., Nakamura, H., Yi, J. & Wang, S. (2021, januari 3). *Kubernetes Components*. <https://kubernetes.io/docs/concepts/overview/components/>
- Pettey, C. (2019, april 23). *6 Best Practices for Creating a Container Platform Strategy*. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/6-best-practices-for-creating-a-container-platform-strategy/>
- RedHat. (2021a, maart 24). *Introduction to Kubernetes architecture*. Verkregen 24 maart 2021, van <https://www.redhat.com/en/topics/containers/kubernetes-architecture>
- RedHat. (2021b, maart 16). *What is container orchestration?* <https://www.redhat.com/en/topics/containers/what-is-container-orchestration>
- Rice, L. The State of Kubernetes Security. Engles. In: Paris Container Day. Paris Container Day. Parijs, 2019, juni 12. Verkregen 29 maart 2021, van https://www.youtube.com/watch?v=_l56oUxHSio
- Rice, L., Rojas, R., Huang, H. & Rotem, Y. (2021, februari 23). *kube-bench*. <https://github.com/aquasecurity/kube-bench>
- StackRox. (2020, februari 19). *State of Container and Kubernetes Security* (onderzoeksrap.). StackRox. <https://www.stackrox.com/kubernetes-adoption-security-and-market-share-for-containers/>
- Taylor, T. (2019, maart 25). *Top 7 Kubernetes security tools to harden your container stack*. Verkregen 29 maart 2021, van <https://techgenix.com/kubernetes-security-tools/>
- Tigera. (2021, maart 28). *What is Calico?* <https://www.projectcalico.org/>
- Tripwire. (2019, januari 1). *Tripwire State of Container Security Report* (onderzoeksrap.). Tripwire. Verkregen 30 november 2020, van <https://3b6xlt3iddqmuq5vy2w0s5d3-wpengine.netdna-ssl.com/state-of-security/wp-content/uploads/sites/3/Tripwire-Dimensional-Research-State-of-Container-Security-Report.pdf>
- VMWare. (2021, februari 8). *Hypervisor*. <https://www.vmware.com/topics/glossary/content/hypervisor>