

Datacenter inrichting

D. Leeuw

16 november 2022

Versie 0.6.0

quis custodiet ipsos custodes
(Wie bewaakt de bewakers)?

Juvenal

© 2021 Dennis Leeuw



Dit werk is uitgegeven onder de Creative Commons BY-NC-SA Licentie en laat anderen toe het werk te kopiëren, distribueren, vertonen, op te voeren, en om afgeleid materiaal te maken, zolang de auteurs en uitgever worden vermeld als maker van het werk, het werk niet commercieel gebruikt wordt en afgeleide werken onder identieke voorwaarden worden verspreid.

Over dit Document

Dit document behandelt de opslag van data op de verschillende opslagsystemen voor het middelbaar beroepsonderwijs in Nederland.

Versienummering

Het versienummer van elk document bestaat uit drie nummers gescheiden door een punt. Het eerste nummer is het major-versie nummer, het tweede nummer het minor-versienummer en de laatste is de nummering voor bugfixes.

Om met de laatste te beginnen als er in het document slechts verbeteringen zijn aangebracht die te maken hebben met type-fouten, websites die niet meer beschikbaar zijn, of kleine foutjes in de opdrachten dan zal dit nummer opgehoogd worden. Als docent of student hoeft je je boek niet te vervangen. Het is wel handig om de wijzigingen bij te houden.

Als er flink is geschreven aan het document dan zal het minor-nummer opgehoogd worden, dit betekent dat er bijvoorbeeld plaatjes zijn vervangen of geplaatst/weggehaald, maar ook dat paragrafen zijn herschreven, verwijderd of toegevoegd, zonder dat de daadwerkelijk context is veranderd. Een nieuw cohort wordt aangeraden om met deze nieuwe versie te beginnen, bestaande cohorten kunnen doorwerken met het boek dat ze al hebben.

Als het major-nummer wijzigt dan betekent dat dat de inhoud van het boek substantieel is gewijzigd om bijvoorbeeld te voldoen aan een nieuw kwalificatiedossier voor het onderwijs. Een nieuw major-nummer betekent bijna altijd voor het onderwijs dat men in het nieuwe schooljaar met deze nieuwe versie aan de slag zou moeten gaan. Voorgaande versies van het document zullen nog tot het einde een schooljaar onderhouden worden, maar daarna niet meer.

Document ontwikkeling

Het doel is door middel van open documentatie een document aan te bieden aan zowel studenten als docenten, zonder dat hier hoge kosten aan verbonden zijn en met de gedachte dat we samen meer weten dan alleen. Door samen te werken kunnen we meer bereiken.

Bijdragen aan dit document worden dan ook met alle liefde ontvangen. Let u er wel op dat materiaal dat u bijdraagt onder de CC BY-NC-SA licentie vrijgegeven mag worden, dus alleen origineel materiaal of materiaal dat al vrijgegeven is onder deze licentie.

De eerste versie is geschreven voor het ROC Horizon College.

Versienummer	Auteurs	Verspreiding	Wijzigingen
0.1.0	Dennis Leeuw	Initieel document	

Tabel 1: Document wijzigingen

Inhoudsopgave

Over dit Document	i
1 Het datacenter en de serverruimte	1
1.1 De inrichting van een datacenter	1
1.2 DER, SER en MER	2
1.3 De vloer	3
2 Een datacenter cabinet	5
2.1 De kast	5
2.2 De servers	6
2.3 Stroomvoorziening	8
2.4 Netwerkbekabeling	8
3 Netwerk voorzieningen	9
3.1 Patch-panelen	9
3.2 Top of Rack Switches	10
3.3 Netwerk bekabeling	10
3.4 Hiërarchisch Netwerk Ontwerp	10
3.5 Spine-Leaf architectuur	12
4 Voeding	15
4.1 Electriciteitsnet	15
4.2 UPS	16
4.2.1 Batterijen	16
4.2.2 Vliegwielen	16
4.3 Generator	17
4.4 Distributie paneel	17
4.5 PUE	17
5 Koeling	19
5.1 Lucht circulatie	19

5.2	Temperatuur	20
5.3	Luchtvochtigheid	20
5.4	Koeltechnieken	20
5.4.1	Compressorkoeling	20
5.4.2	Adiabatische koeling	20
5.4.3	PCM koeling	21
5.4.4	Vloeistofkoeling	21
6	Beveiliging	23
6.1	Redundantie	23
6.1.1	N+1	23
6.1.2	2N	23
6.1.3	2(N+1)	24
6.1.4	xN/y	24
6.2	TIA-942 Datacenter Classificatie	24
6.2.1	Tier-1	25
6.2.2	Tier-2	25
6.2.3	Tier-3	25
6.2.4	Tier-4	26
6.3	Toegangsbeveiliging	26
6.4	Calamiteiten bewaking en beveiliging	26
7	Onderhoud	29
7.1	Soorten onderhoud	29
7.2	Stof	30
7.3	Blusmiddelen	30
7.4	Koeling	30
7.5	Voeding	30
7.6	Veiligheid	31
7.7	Component controle	31
	Index	33

Hoofdstuk 1

Het datacenter en de serverruimte

Datacentra kunnen de omvang hebben van een bezemkast of enkele voetbalvelden beslaan. Wat ze gemeen hebben is dat het een concentratie is van data verwerkende systemen. Bij de wat kleinere bedrijven worden ze ook vaak aangeduid als serverruimte omdat het de plek is waar de servers staan, de machines die diensten aanbieden aan de gebruikers. Het feit dat wij spreken over datacentra heeft te maken met het feit dat er zich veel meer in een serverruimte bevindt dan alleen servers, er staan bijvoorbeeld ook switches, routers en stroom- en koelvoorzieningen.

Datacentra beginnen bij bedrijven meestal klein en groeien met de organisatie mee. Internet Service Providers beginnen meestal meteen met een grote ruimte en bedrijven als Google hebben hun datacentra modulair opgebouwd. Zij hebben containers die volledig zelfstandig kunnen werken en zetten er waar nodig containers bij om meer servers te hebben.

Voor al deze vormen van centralisatie van rekencapaciteit zijn een aantal zaken hetzelfde en er zijn ook een aantal verschillen. Dit document geeft je meer inzicht in de technieken die binnen een datacentrum spelen en waar je rekening mee dient te houden.

<https://www.dutchdatacenters.nl/datacenters/hoe-werkt-een-datacenter/>

1.1 De inrichting van een datacenter

Een datacenter is erop ingericht om zoveel mogelijk rekencapaciteit (servers) kwijt te kunnen op een zo efficiënt mogelijke manier. De meest efficiënte manier van inrichten is door standaardisatie. Desktops, laptops, mini- en midi-towers door elkaar heen levert geen efficiënte inrichting op. De keuze is gemaakt om servers te maken met een breedte van 19" en een hoogte die

moet voldoen aan 1U (1,75 inch, 44,45 mm) of een veelvoud daarvan.

Deze servers hangen in kasten die we racks of cabinetten noemen. De breedte van de kasten is gestandaardiseerd op de breedte van de servers en deze worden dan ook 19"-kasten, 19"-racks of 19"-cabinets genoemd.

In de kasten zit een voorziening voor het aansluiten van de servers op de spanning. Deze aansluitingen noemen we de power-strips. Om te zorgen dat dipjes en pieken gefilterd worden en een kortstondige uitval van de spanning opgevangen wordt zijn datacenters uitgerust met UPS-systemen. UPS staat voor Uninterruptable Power Supply en is een voorziening die ervoor zorgt dat bij uitval van de hoofd elektriciteitsvoorziening het datacenter toch van spanning en stroom voorzien blijft.

Binnen een datacenter vinden we naast de servers natuurlijk ook voorzieningen voor netwerkaansluitingen zoals patchpanelen, switches en routers en hele bossen aan netwerkkabels die op een gestructureerde manier weggewerkt moeten worden.

Omdat datacenters afgesloten ruimtes zijn met vaak beperkte toegang voor een paar bevoegden en zo ingericht zijn dat er zoveel mogelijk servers in passen is de warmte die door die server gecreëerd wordt een probleem. Koeling is dan ook een van meest cruciale onderdelen in het ontwerp van een datacentrum.

1.2 DER, SER en MER

Een datacenter kan een ruimte zijn bij een ISP, bij een hosting-organisatie of bij Amazon of Google, maar het kunnen ook de ruimtes binnen een organisatie zijn waar de servers hangen. Om een beeld te schetsen hoe een netwerk binnen een organisatie eruit zou kunnen zien moeten we een paar nieuwe termen introduceren. Het gaat dan om termen die gebruikt worden om de verschillende ruimtes binnen een gebouw aan te geven.

We beginnen bij de kantoren waar de gebruikers zitten. Daarvandaan loopt er bekabeling naar de DER ofwel de Distribution Equipment Room. Een DER is vaak een kast, soms zonder koeling, waar de kabels uit de verschillende kantoren samen komen. Het zou bijvoorbeeld een ruimte per vleugel of per etage kunnen zijn. De ruimte bevat de access switches en patchpanelen die alle aangesloten apparatuur verbindt met het centrale netwerk.

Vanuit de DER lopen er kabels naar een SER (Satellite Equipment Room). Deze ruimte bevat de apparatuur die beschikbaar moet zijn voor een bepaalde afdeling of werkgroep.

De laatste ruimte is de MER of de Main Equipment Room. Dit is zoals de naam al aangeeft de hoofdcomputerruimte. Deze ruimte fungeert als de

backbone van het netwerk.

1.3 De vloer

Door de hoge dichtheid van servers per vierkante meter, de vaak grote en zware systemen voor koeling en UPS-systemen maken dat de vloerbelasting van een serverruimte vaak de standaard gebouwontwerp specificaties overstijgen. Als een standaard ruimte ingericht gaat worden als serverruimte moeten er vaak aanpassingen gedaan worden aan de constructie om de draagkracht te versterken. Het is handiger als bij de bouw al rekening is gehouden met de toekomstige inrichting. Bij de bouw van grote datacenters wordt dit dan ook gedaan.

Veel datacenters hebben verhoogde vloeren zodat een luchtstroom mogelijk is die gebruikt kan worden bij de koeling van de kasten. De ruimte onder de vloer kan ook gebruikt worden om kabels weg te werken. De verhoogde vloeren bestaan uit een geaarde staalconstructie die zorgt dat elektrostatische energie afgevoerd wordt. Het gebruik van anti-statische-polsbandjes is in serverruimtes dan ook meestal niet nodig.

Op de staalconstructie liggen roosters en tegels (60x60 cm). De dienen ter doorlating van de luchtstroom en de tegels blokkeren deze juist. Door roosters en tegels op strategische plaatsen te plaatsen kan er gezorgd worden voor een optimale luchtstroom in de ruimte.

Hoofdstuk 2

Een datacenter cabinet

De servers in een serverruimte worden opgehangen in een 19"-kast of 19"-rack. Het verschil is dat een rack open is en een kast gesloten. Racks worden vaak in kleinere ruimtes gebruikt en zijn goedkoper dan kasten. In de grotere datacentra worden kasten gebruikt die afgesloten kunnen worden.

2.1 De kast

Een serverruimte kast kan bestaan uit een rack waarin de servers hangen met een voordeur en achterdeur en twee zijpanelen. Als er meerdere kasten naast elkaar staan kunnen de zijpanelen verwijderd worden zodat de kasten op elkaar aangesloten kunnen worden. Soms worden om de luchtstroom door een kast te bevorderen, zogenaamde schoorsteenwerking, de zijpanelen niet verwijderd. Dit hangt erg van de manier van koelen af. De koeling kan van beneden naar boven door een kast lopen of van voor naar achter.

Kasten kunnen in hoogte verschillen. De meeste kasten zijn tussen de 32 en 54 U hoog. De U is een standaard eenheid van 1,75 inch. De breedte van de servers in de kasten is altijd 19 inch. De daadwerkelijk breedte van een kast hangt af van de extra ruimte die aanwezig is om bijvoorbeeld kabels netjes te kunnen wegwerken.

In de kast worden de servers en andere componenten met schroeven bevestigd aan flenzen die aan de zijkant van de kast zitten. Een PDU (Power Distribution Unit) of Power Strip zorgt voor de stroomvoorziening in de kast. PDUs kunnen 1 of meer Us innemen in de kast of ze kunnen aan de zijkant van de kast gemonteerd zijn.

Om te voorkomen dat de luchtstroom door de kast beperkt wordt zijn er verschillende kabelmanagement systemen verwerkt in een kast. Er zijn de horizontale kabelgeleiders en er zijn verticale kabelgeleiders. Kabels

worden meestal met velcro-strips samen gebonden tot kabelbundels zodat de kast een net en verzorgt uiterlijk heeft.

<https://www.youtube.com/watch?v=TCiZjB9ZXgI>

2.2 De servers

De datacenters zijn uitgerust met 19"-kasten waarin 19"-servers hangen. De 19"-maat staat voor de breedte van de server. De hoogte van een serverkast wordt uitgedrukt in het aantal U. Een normale server, de zogenaamde pizza-doos, is 1U hoog. Harddisks liggen dan plat in de server. Zwaardere servers met meer harddisks hebben de harddisks vaak rechtop op hun zijkant staan die hot-swappable uit de voorkant van de server getrokken kunnen worden. Deze servers zijn 2U hoog.



Figuur 2.1: Foto van Jfreyre afkomstig van <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rack001.jpg>

Om hogere dichtheden te bereiken wordt er gebruik gemaakt van blade servers. Bij blade servers zitten er meerdere servers (blades) in één fysieke behuizing (19"-kast). De servers delen een backplane, de voeding(en) en de behuizing waardoor er effectief meer servers passen op dezelfde oppervlakte. Een nadeel van blades is dat de warmte ontwikkeling ook veel meer geconcentreerd wordt en dat kan leiden tot zogenaamde hotspots, wat slecht is voor de koeling.

2.3 Stroomvoorziening

Het aansluiten van de servers gebeurt zoveel mogelijk in het cabinet, zodat de kast een gesloten geheel vormt. De spanning voor de servers wordt aangeboden via een PDU (Power Distribution Unit). Een PDU is vergelijkbaar met een verdeeldoos in het dagelijksgebruik. De aansluitingen zijn vaak anders. De meest gebruikte aansluitstekkers zijn de C13/C14 stekkers:

Een extra functie die je tegen kan komen in de PDUs is de mogelijkheid om elke uitgang te schakelen via bijvoorbeeld het netwerk (switched PDU). Via een remote protocol zoals bijvoorbeeld een web-interface of ssh kan je inloggen op de PDU en de spanning naar een socket schakelen. Op deze manier kan je een server die niet meer reageert op afstand herstarten in de hoop dat deze na een herstart weer op afstand bedient kan worden. Zo niet dan moet je toch naar de serverruimte lopen.

Een andere functie die je op PDUs kan aantreffen is een verbruiksmeter (metered PDU). Sommige PDUs meten alleen het totale verbruik van de aangesloten apparaten, andere varianten kunnen per socket meten hoeveel het verbruik is. Op deze manier kan je bijvoorbeeld het verbruik doorbelasten naar de gebruiker.

2.4 Netwerkbekabeling

De meeste kasten hebben in de kast een plek waar de servers aangesloten kunnen worden op het netwerk. De traditionele manier is dat een kast voorzien is van een patchpaneel. In het volgende hoofdstuk zullen we ook andere oplossingen bekijken. De servers worden met zogenaamde patchkabels (flexibele kabels) aangesloten op het patchpaneel. Om de koeling in de kast niet te veel te verstoren is het van belang dat de kabels op een ordelijke manier in de kast verwerkt worden en het geen spaghetti wordt.

Om de kabels netjes weg te werken zitten er horizontale kabel begeleiders in de kast om de bekabeling van de servers naar de zijkant te brengen en er zijn verticale kabelbegeleiders die de kabels begeleiden van boven naar beneden of van beneden naar boven.

De patchpanelen zijn bekabeld met stugge (solide) kabels die de kast verbindt met de rest van de serverruimte.

Hoofdstuk 3

Netwerk voorzieningen

3.1 Patch-panelen

Patchpanelen zijn passieve componenten, dat betekent dat ze niet iets met het signaal doen. Patchpanelen worden veelal in serverkasten gebruikt om de servers met patchkabels te koppelen aan de bekabeling die naar de serverruimte switches lopen. De IEEE 802.3 ethernet standaard zegt dat de maximale lengte van een ethernet kabel 100 meter is waarbij er twee keer 5 meter patch kabel gebruikt mag worden en dat de overige 90 meter moet bestaan uit solide koper bekabeling. Deze solide koperbekabeling wordt dan ook vaak gebruikt als bekabeling tussen een patchpaneel en de switch waarbij binnen de kast gebruik gemaakt wordt patchkabels die bestaan uit stranded (getwijnde) bekabeling.

Patchpanelen kunnen bovenin of onderin de kast gemonteerd worden, of in het midden van de kast. Het voordeel van de montage in het midden van de kast is er minder verschillende kabellengtes nodig zijn om de servers aan te sluiten op de patchpanelen en dat de kabelbomen aan de zijkanten van de kast kleiner zullen zijn omdat de ene helft omhoog loopt en de andere helft maar beneden. Dit helpt in het overzichtelijk en netjes houden van de bekabeling in de kast.

Patchpanel montage: <https://spl-play.learningcloud.me/admin/sprints/5e3b1e8e79a83f25dd79f792/>

Patchbekabeling: <https://spl-play.learningcloud.me/admin/sprints/5e3b1eea32eea20fcd021bb7/>

3.2 Top of Rack Switches

Met de uitvinding van VLANs kunnen de patchpanelen in de kast vervangen worden door switches.

De zogenaamde "top of rack-switches vervangen de patchpanelen in een kast. Een "top of rack-switch kan natuurlijk ook in het midden of onderin de kast hangen. Het voordeel van een switch inplaats van een patchpaneel is de verminderde hoeveelheid bekabeling van het rack naar de serverruimte switch. Het nadeel is dat de kabel van het rack naar de serverruimte switch alle data moet kunnen verwerken van alle servers in het rack.

3.3 Netwerk bekabeling

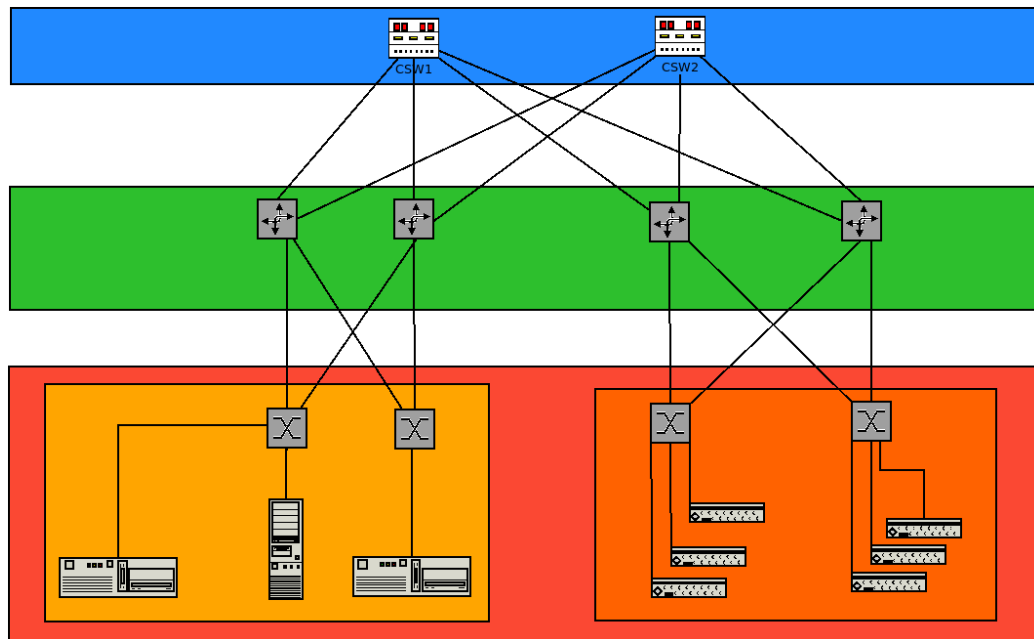
De bekabeling in een datacenter bestaat uit lange koperkabels, tot 90 meter, of fiber kabels die de verschillende componenten met elkaar verbinden. Deze zelfde kabeltypes worden ook gebruikt om verschillende datacentra onderling te koppelen. We spreken hier van de horizontale bekabeling door gebouwen, het zijn ook de kabels die lopen vanaf de switches naar de wall-oulets in de verschillende kantoren.

Naast deze horizontale bekabeling zijn er de patchkabels die switches of patchpanelen verbinden met servers of patchpanelen met de poorten van switches. Het zijn de flexibele kabels die makkelijk verlegt kunnen worden.

De kabels in een datacentrum kunnen worden weggewerkt onder de vloer, boven een systeemplafond of in metalen kabelgoten die aan het plafond hangen.

3.4 Hiërarchisch Netwerk Ontwerp

Het Hiërarchisch Netwerk Ontwerp is een oorspronkelijk door Cisco bedacht model. Dit netwerk model bestaat uit 3 lagen en wordt daarom ook wel het Three-Tier-model genoemd. De access laag, de distributie laag en de core laag zoals weergegeven in figuur [3.1](#).



Figuur 3.1: Blauw is de core, groen is de distributie laag en rood is de access laag met links de gebruikers en rechts der servers

Op de access laag (rood in bovenstaande tekening) worden over het algemeen access switches gebruikt (OSI-layer 2), maar ook routers kunnen op deze laag voorkomen (bijvoorbeeld de Top-of-Rack switches). Dit zijn "goedkope" switches die zorgen dat er voldoende poorten zijn voor alle gebruikers en alle servers in het netwerk. VLANs worden vaak op de access laag gebruikt om broadcast domains van elkaar te scheiden. De kosten per port is hier vaak de belangrijkste afweging. Het uitvallen van een access switch treft alleen de aangesloten gebruikers en heeft verder geen invloed op de rest van de organisatie. Dit is niet het geval als het een access switch in de serverruimte is waar meerdere servers aan hangen.

Op de distributie laag (groen in bovenstaande tekening) vinden we de meer intelligente devices die bijvoorbeeld afdelingen binnen een organisatie van elkaar scheiden door bijvoorbeeld firewalling, IP-routing en filtering. Ook QoS wordt op vaak op deze laag geregeld. Verbindingen naar andere kantoren van een organisatie behoren ook tot de distributie laag.

De core laag (blauw in bovenstaande tekening) bevat vaak de duurste netwerk onderdelen omdat deze moeten zorgen dat er grote hoeveelheden data op een snelle manier verdeeld worden over de verschillende distributie componenten. Vaak zijn de core componenten redundant uitgevoerd. De hoogste netwerksnelheden per port vinden we vaak in deze laag. Omdat

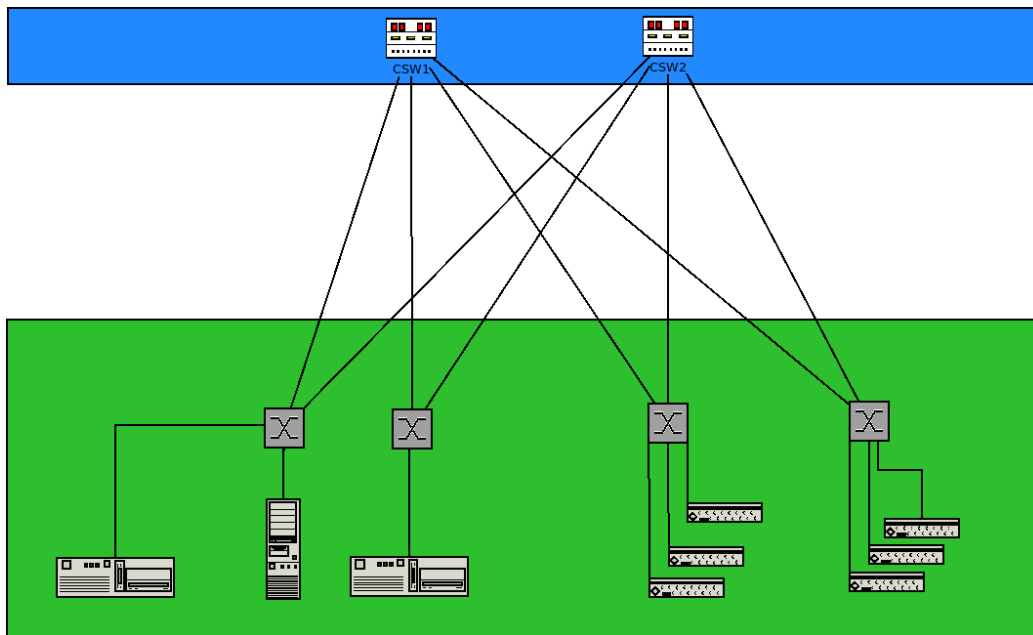
snelheid hier de fundamentele factor is vind hier geen of nauwelijks filtering plaats. Op deze laag kunnen we switches of routes (Layer 2 of 3 technologie) tegen komen.

Dit model om een datacenter op te zetten is vooral bedoeld als er veel north-south verkeer is. Dat wil zeggen dataverkeer dat van boven naar beneden door het model gaat, er is dan dus veel verkeer van binnen naar buiten en omgekeerd. Denk hierbij aan een datacenter dat veel faciliteiten aanbiedt aan gebruikers die niet zelf in het datacenter zitten zoals bijvoorbeeld webservers.

Elke core switches is verbonden met elke distributie-switch en elke distributie-switch is redundant verbonden met de access-switches. Door deze redundantie kan er data in rondgangen (loops) door het netwerk gaan. Om dit tegen te gaan is er het spanning-tree protocol (IEEE802.1d,w,s en IEEE802.1q). Het juist configureren van het spanning-tree protocol is dan ook een must in een Three-tier netwerk.

3.5 Spine-Leaf architectuur

Een ander model is het Spine-Leaf model, Two-Tier-model, waarbij er maar twee lagen switches zijn. In situaties waarbij er veel server naar server communicatie is heeft dit systeem zijn voordelen (East-West traffic). Het gaat dan om veel verkeer binnen een datacenter



Figuur 3.2: Blauw is de spine, groen is de leafes laag en rood is de access laag

De spine-switches zijn switches met een hoge throughput, lage latency en met poorten die een high-speed verbinding hebben met de leaf-switches.

De leaf-switches zijn de feitelijke Top-of-Rack (TOR) switches met 24 of 48 poorten, maar met een zeer snelle uplink naar de spine-switches.

Voordelen van het two-tier model ten opzicht van het three-tier model:

- Geen spanning-tree nodig, daar elke spine-switch verbonden is met alle leaf-switches en er geen loops gecreëerd kunnen worden
- Tussen de servers in het datacenter zitten maximaal 2 hops, wat resulteert in een lage latency.

Nadelen van het two-tier model ten opzicht van het three-tier model:

- Doordat elke spine switch met elke leaf switch verbonden moet zijn, is er meer kabel nodig naar de acces (leaf) laag.

Hoofdstuk 4

Voeding

Het aansluiten van een datacentrum op het elektriciteitsnet in Nederland gebeurt meestal met 10 kVac of 20 kVac aansluitingen. Transformatoren zetten de aangeleverde hoogspanning om in 400 Vac welke de binnenkomende spanning is voor het datacentrum. Dit is de ingangsspanning voor de Main Distribution Boards (MDBs). MDBs zijn panelen of kasten die de zekeringen, schakelaars en aardlekzekeringen bevatten. De MDBs distribueren de spanning naar de verschillende onderdelen zoals UPS (Uninterrupted Power Supply) systemen. Uiteindelijk wordt er dan 240 Vac naar de 19-kasten gestuurd.

Het starten van de generator(en) is meestal een taak van de MDBs, deze doen dat zodra ze het wegvallen van het elektriciteitsnet waarnemen.

4.1 Electriciteitsnet

Een redundant systeem heeft twee aanvoerleidingen vanuit het elektriciteitsnet, het liefst vanuit een verschillende richting of van verschillende leveranciers. Dit zorgt ervoor dat er spanning blijft ook als één aanvoerlijn uitvalt. Daarmee zijn we nog niet veilig want ook het totale elektriciteitsnet kan uitvallen en dan zit het datacentrum alsnog zonder spanning. Om dat op te kunnen vangen worden er vaak generatoren geplaatst bij een datacentrum. De generatoren werken op diesel of gas en wekken elektriciteit op dat voldoende is om een datacentrum voor bijvoorbeeld 24 of 48 uur van spanning te voorzien. Het opstarten van generatoren kost echter tijd, we laten ze niet dag en nacht draaien dat zou te veel energie (diesel of gas) kosten. De overbrugging tussen het uitvallen van het electriciteitsnet en het opstarten van de generator wordt opgevangen door een UPS.

4.2 UPS

De functie van de UPS (Uninterruptable Power Supply) is tweeledig. De eerste taak is het opvangen van kleine pieken en dalen in de elektriciteitsvoorziening. Computer apparatuur is over het algemeen gevoelig voor spanningswisselingen. Door de aanvoer eerst door een UPS systeem te laten gaan werken zorgen de batterijen van de UPS voor demping van pieken of opvulling van dalen waardoor er een veel gelijkmatigere aanvoer van vermogen is. De tweede functie van de UPS is het opvangen van de periode tussen het uitvallen van het elektriciteitsnet en het starten van de generator. Over het algemeen moet een UPS systeem het gehele datacentrum voor ongeveer 5 minuten van het volledige vermogen kunnen voorzien, zodat de generator de tijd heeft om meerdere keren te starten. Ook hier moet rekening gehouden worden met het feit dat de generator misschien niet meteen de eerste keer start.

UPS systemen zijn traditioneel gebouwd met batterijen, modernere varianten hebben een vliegwiel.

https://download.schneider-electric.com/files?p_File_Name=DB0Y-77FNCT_R2_EN.pdf&p_Doc_Ref=SPD_DB0Y-77FNCT_EN

4.2.1 Batterijen

Traditioneel gebruiken de meeste uninterruptable power supply systemen batterijen. Batterijen kunnen relatief makkelijk veel energie opslaan, het nadeel is dat ze veel onderhoud vergen en regelmatig gecontroleerd moeten worden op hun functioneren.

Batterijen zijn DC (Direct Current) spanningscomponenten, de aanvoer is AC (Alternating Current) en ook de levering aan de cabinetten is een wisselspanning. Om als buffer te kunnen dienen moet eerst de aanvoer omgezet worden in DC en daar na moet de DC spanning weer omgevormd worden naar AC. De technieken voor een energiezuinige UPS halen een rendement van rond de 95% of iets meer. Er blijven dus verliezen optreden en dus ontstaat er ook warmte.

<https://www.youtube.com/watch?v=UMtftcKACRA>

4.2.2 Vliegwiel

Het vliegwiel is geen nieuwe techniek, maar wel als functie in het datacenter. Veel serverruimtes maken nog gebruik van batterijen om voor langere tijd energie op te slaan. Een vliegwiel maakt gebruik van de traagheid van massa. De inkomende energie van het elektriciteitsnet zorgt ervoor dat een

zware schijf rondgedraaid wordt, deze schijf is ook verbonden met een generator. Als de netspanning wegvalt zal het draaiende gewicht de generator laten doordraaien en zo kan ongeveer 15 seconden tot een minuut aan spanningsdip opgevangen worden. In die 15 seconden moet een dieselgenerator of gasturbine gestart worden die de wegvallende netspanning opvangt.

<https://www.youtube.com/watch?v=kQir0FEygJQ>

4.3 Generator

Een generator voor een datacenter is meestal een diesel of gas gestookte generator. Een generator is feitelijk een grote motor die elektriciteit opwekt. Het opstarten van een generator heeft enige tijd nodig waardoor er de noodzaak van een UPS blijft om de eerste klap op te vangen van het wegvallen van het elektriciteitsnet. De UPS kan wel kleiner zijn omdat deze alleen de directe dip hoeft op te vangen. Zodra de generator draait heeft de UPS geen functie meer.

Bij de grotere datacentra kunnen generatoren 24 tot 48 uur de spanning opvangen voordat ze zonder brandstof zitten.

4.4 Distributie paneel

De Main Distribution Board of in het Nederlands het Distributie Paneel is een stuk elektronica in een datacentrum dat de inkomende spanning distribueert, als het nodig is transformeert, bewaakt en monitort. Op een MDB kom je zekeringen, aardlekschakelaars, hoofdschakelaars en meters tegen. De zekeringen en aardlekschakelaars kunnen bij overbelasting of een aardlek lijnen afschakelen. De meters geven weer wat de spanning is en wat het huidige stroomverbruik is.

MDBs zijn goed te vergelijken met de functionaliteit van de meterkast in een huis.

4.5 PUE

PUE of Power Usage Effectiveness is een waarde die gebruikt kan worden om de effectiviteit van een datacenter te meten. Naast het verbruik van de servers en netwerkkapparatuur is er natuurlijk ook het verbruik door koeling, verlichting, monitoren etc. De PUE geeft aan hoe efficiënt een datacenter is ingericht. Meestal zit dit getal zo rond de 2 wat betekent dat er 2x zoveel energie het datacenter in gaat als dat er gebruikt wordt door alle servers,

switches en routers bij elkaar. Moderne datacenters van Google en Microsoft zitten rond een PUE van 1,2 en zijn daarmee zeer efficient. Een PUE van 1,00 zou betekenen dat alle energie die een datacenter in gaat ook daadwerkelijk gebruikt wordt als computingpower. Dat zou betekenen 100% efficient en is in de praktijk natuurlijk nooit haalbaar. De PUE wordt berekend door:

$$PUE = \frac{\textit{totale faciliteitsverbruik}}{\textit{verbruik door computerapparatuur}} \quad (4.1)$$

Als een ruimte dus 20.000 MW gebruikt en de IT-apparatuur gebruikt 15.000 MW dan is de PUE:

$$PUE = \frac{20000}{15000} = 1,333 \quad (4.2)$$

Hoofdstuk 5

Koeling

Vroeger was het grootste probleem in een datacenter de ruimte, het snel groeiende aantal servers stuite op een ruimte probleem. Met de opkomst van virtualisatie is dat probleem getackeld. De virtualisatie creëerde echter wel een ander probleem: koeling. 10 servers die hoofdzakelijk uit hun neus staan te peuteren verbruiken stroom, maar creëren nauwelijks warmte. Eén server die stevig staat te stampen om 10 virtuele machines in de lucht te houden gebruikt minder stroom dan de tien bij elkaar opgeteld, maar zorgt voor meer warmte dan de 10 machines bij elkaar.

De warmte die veroorzaakt wordt door de servers in het datacenter moet worden afgevoerd. Traditioneel gebeurde dat met airco's, maar met de ontwikkeling van groenere datacentra wordt er steeds vaker voor andere technieken gekozen, zoals het koelen met buitenlucht of het koelen met vloeistoffen.

5.1 Lucht circulatie

De traditionele manier van koelen koelt de gehele serverruimte. De koude lucht wordt onder de verhoogde vloer ingebracht, komt via roosters in de koude corridor tussen de servers (aan de voorkant van de servers), de servers zuigen de lucht aan de voorkant aan via hun ventilatoren en blazen de warme lucht er aan de achterkant uit in de warme corridor tussen de serverracks. Ventilatoren aan het plafond (warme lucht stijgt op) voeren de warme lucht af.

<https://www.youtube.com/watch?v=xBxyhxmhigc>

5.2 Temperatuur

Elektronica werkt het best bij temperaturen van 20 tot 22 graden Celcius, echter elke graad Celcius temperatuur verhoging maakt dat we minder stroom verbruiken om te koelen. Daarom worden veel datacentra op 25°C gehouden.

5.3 Luchtvochtigheid

Ook de luchtvochtigheid is van belang zie hiervoor een artikel van bit.nl: <https://www.bit.nl/news/88/468/De-zin-en-onzin-van-luchtbevochtiging>

5.4 Koeltechnieken

5.4.1 Compressorkoeling

Compressor koeling ook wel de airco (air compressor) genoemd is de klassieke manier om datacenters te koelen. Het systeem werkt op basis van water. Warm water wordt naar een unit gebracht die buiten hangt of staat. De koude lucht koelt het water af en het koude water wordt weer naar binnen gepompt om de warme lucht uit de serverruimte te koelen. Als het water niet voldoende afkoelt aan de buitenlucht worden er compressorkoelers gebruikt om het water verder af te koelen.

Het nadeel van dit systeem is dat er dure compressors in zitten en pompen en dat het geheel zelf behoorlijk wat stroom verbruikt. Daarnaast geldt ook hier, hoe meer onderdelen hoe meer kans op defecten.

5.4.2 Adiabatische koeling

Bij adiabatische koeling wordt de warme lucht uit de serverruimte gekoeld door koelers in de buitenlucht te besprenkelen met water waardoor verdamping optreedt. Dit kost natuurlijk water wat niet erg milieu vriendelijk is.

Een alternatief is de indirecte adiabatische koeling. Via een warmte wisselaar wordt de warme lucht direct gekoeld aan de buitenlucht, als de buitenlucht te warm is om voldoende te koelen dat wordt er teruggevallen op het gebruik van de verdamping van water voor de koeling. Voordeel van dit systeem is dat er geen buitenlucht in het datacenter terecht komt.

5.4.3 PCM koeling

PCM staat voor Phase Change Material. De techniek gebruikt de overgang van vast naar vloeibaar en van vloeibaar naar vast om kou of warmte op te slaan en werkt dus feitelijk als een thermische batterij.

De PCM techniek maakt gebruik van de buitenlucht en het feit dat de temperatuur 's nachts lager is dan overdag. Een anorganische stof wordt door menging met zouten zo ingeregeld dat deze vanaf een bepaalde temperatuur stolt of smelt. De warmte uit de serverruimte zal overdag de stof doen smelten hierdoor kan de PCM grote hoeveelheden warmte opnemen. Als de buitenlucht beneden de ingestelde temperatuur komt dan kan de buitenlucht de opgeslagen warmte afvoeren waardoor de stof weer stolt.

Deze techniek gebruikt aanmerkelijk minder stroom dan een traditionele airco-koeling. Fabrikanten claimen tot 90% vermindering van het energieverbruik.

5.4.4 Vloeistofkoeling

Een techniek die langzaamaan ingang lijkt te vinden in het datacenter is het gebruik van vloeistofkoeling. Het is een techniek die gamers al wat langer kennen, maar die beperkt bleef tot thuis gebruik. Sinds kort wordt deze techniek ook gebruikt voor servers in de serverruimte. De techniek komen we vooral tegen bij HPC (High Performance Computing) clusters.

Hoofdstuk 6

Beveiliging

6.1 Redundantie

Datacenter redundantie kan op verschillende manieren worden uitgedrukt. Om een 100% uptime te bewerkstelligen is het noodzakelijk om voeding en koeling redundant uit te voeren. Als bijvoorbeeld een koelunit ermee stopt moet er voldoende extra koelcapaciteit zijn om de koeling van de defecte unit over te nemen.

Bij een volledig belast datacenter zonder defecten wordt de redundantie uitgedrukt als N . Dat wil zeggen geen redundantie. Zodra er een calamiteit is is er geen overcapaciteit om dit op te vangen en zal er dus downtime optreden.

6.1.1 $N+1$

Minimale redundantie wordt verkregen met $N+1$. Door bijvoorbeeld een compleet redundant UPS systeem neer te zetten kunnen we onderhoud uitvoeren op 1 UPS, de andere UPS kan dan de volledige load op zich nemen mocht er een stroomuitval zijn tijdens het onderhoud.

Een algemene regel bij het ontwerpen van datacentra met een $N+1$ regel is dat voor elke 4 units die we nodig hebben we 1 extra unit plaatsen. Dus als er in een ruimte 8 koelunits nodig zijn dan plaatsen we er 10.

6.1.2 $2N$

Een volledig redundant systeem heet $2N$, dit betekent dat voor elke unit we plaatsen er een redundante unit geplaatst wordt. Als er 8 koelunits nodig zijn, dan plaatsen we er 16.

6.1.3 $2(N+1)$

Is een volledig redundant systeem van een $N+1$ opstelling. Dit geeft de zekerheid dat zelfs als een volledig systeem eruit ligt er nog steeds $N+1$ redundantie is. Het nadeel is natuurlijk wel de hoge kosten, zowel qua aanschaf als qua onderhoud, en de vele extra vierkantenmeters die nodig zijn voor alle extra units.

6.1.4 xN/y

Een variant op de $2N$ oplossing is een oplossing waarbij de lasten verdeeld worden. Stel we hebben een serverrack dat 1500 Watt nodig heeft bij totale belasting. Als we dat redundant willen maken met $2(N+1)$ betekent dat dat we 2×1500 Watt UPS nodig hebben voor $N+1$ en dat moeten we verdubbelen voor $2 \times N+1$, dus we hebben $4 \times$ een 1500 Watt UPS systeem nodig.

Door de lasten te verdelen kunnen we een soortgelijke bescherming krijgen tegen lagere kosten. Door de last te verdelen over bijvoorbeeld 3 systemen van 750 Watt zouden we bij uitval van 1 systeem een capaciteit van 1500 Watt over. We hebben dan dus 3 systemen, kleinere en goedkopere systemen, waarvan er 1 volledig mag uitvallen (2 blijven er werken). Dat noemen we $3N/2$. Voor de berekening van de capaciteit per systeem nemen we de totale capaciteit die we nodig hebben (N) en delen dat door het aantal systemen dat moet blijven functioneren (y). In dit voorbeeld dus $1500/2 = 750$ Watt. Voor de redundatie hebben we 1 systeem nodig en daarmee komt het totaal aantal systemen (x) op 3.

Met $4N/3$ hebben we 4 systemen waarvan er 1 mag uitvallen. Uit ons vorige voorbeeld zou dat betekenen dat we 4 UPSen van 500 Watt ($1500/3$) neerzetten waarvan er 1 mag uitvallen zodat we dan nog steeds 1500 Watt over houden. $4N/2$ geeft ons 4 UPSen van 750 watt waarvan er 2 mogen uitvallen.

6.2 TIA-942 Datacenter Classificatie

Het doel van een datacenter is om zo hoog mogelijke beschikbaarheid en continuïteit te leveren tegen zo laag mogelijke kosten. Om duidelijk te maken wat je van een datacentrum mag verwachten heeft de Telecommunications Industry Association (TIA) in TIA-942 een tier-classificatie beschreven. Tier-1 is de laagste kwaliteit en Tier-4 de hoogste.

<https://web.archive.org/web/20131230235600/http://www.te.com/content/dam/te/global/english/industries/enterprise-network-s>

[olutions/knowledge-center/documents/enterprise-white-paper-tia-942-data-center-standards-overview-102264ae.pdf](https://www.knowledge-center.com/documents/enterprise-white-paper-tia-942-data-center-standards-overview-102264ae.pdf)

6.2.1 Tier-1

Heeft in principe geen extra capaciteit die benut kan worden bij calamiteiten. De stroom en koeling worden via een enkelvoudig pad aan gegevensverwerkende apparatuur geleverd, zonder redundante componenten. Geplande en ongeplande uitval zal downtime tot gevolg hebben.

redundancy N

Beschikbaarheid 99,671 %

Jaarlijkse downtime 28,8 uur

6.2.2 Tier-2

De stroom en koeling worden verzorgd door middel van een enkel pad, maar er zijn redundante componenten. In deze datacentra zijn er een UPS en een generator aanwezig. Het centrum heeft ook een verhoogde vloer. Bij onderhoud zullen er onderdelen off-line moeten worden genomen om zonder verstoring de dienstverlening te kunnen voortzetten. Elke ongeplande uitval zal meestal downtime tot gevolg hebben.

redundancy N+1

Beschikbaarheid 99,741 %

Jaarlijkse downtime 22 uur

6.2.3 Tier-3

Heeft zowel redundante componenten als meerdere onafhankelijke voedingen en koeling distributiepaden. Één pad is echter maar actief, dus routine-onderhoud en uitval geven negatieve invloed op de beschikbaarheid. Geplande downtime kan zonder verstoring, ongeplande downtime kan verstoring opleveren.

redundancy N+1

Beschikbaarheid 99,98 %

Jaarlijkse downtime 1,6 uur

6.2.4 Tier-4

Heeft meerdere redundante componenten ($2N+1$) en meerdere onafhankelijk actieve vermogen- en koeling distributiepaden naar alle apparatuur. Uitval voor onderhoud of door verstoring van een component of distributiepad heeft geen negatieve invloed op de beschikbaarheid. Datacenter kan minimaal 1 ongeplande verstoring hebben zonder dat er downtime ontstaat. Beschikbaarheid : 99,995% Jaarlijkse downtime: 0,4 uur

redundancy $2N+1$

Beschikbaarheid 99,995 %

Jaarlijkse downtime 0,4 uur

6.3 Toegangsbeveiliging

Afhankelijk van de grootte en de locatie van een datacentrum kunnen er verschillende toegangsbeperkingen zijn. Een kleine ruimte kan afgesloten zijn met een sleutel of een paslezer, de grote datacentra hebben een poort, toegangscontrole met paspoort controle en afgesloten kasten zodat je alleen bij jouw kast kan komen. Elke colo (colocatie) heeft zijn eigen procedures voor toegang, waarbij alleen toegang op afspraak de meest bekende is. Ook wordt er geregistreerd wie er binnen is zodat in geval van een calamiteit of een latere controle vast te stellen is wie er in het pand aanwezig was.

Vele datacentra zijn tevens uitgerust met camera's en infraroodsensoren.

6.4 Calamiteiten bewaking en beveiliging

Binnen een datacenter is het belangrijk om een aantal zaken te monitoren. Natuurlijk zijn er temperatuur- en hygrometers. Een hygrometer meet de luchtvochtigheid. Naast deze meters moeten er ook detectoren zijn die waarnemen of er brand is, dit zijn vaak rookmelders.

De meldingen van deze meters kunnen lokaal zijn, af te lezen op bijvoorbeeld een display in de serverruimte, of op afstand uitleesbaar waardoor de ruimte in de gaten gehouden kan worden vanuit een controle room.

Daar er in een datacentrum veel servers hangen is het grootste risico oververhitting van kabels en het daardoor ontstaan van brand. Blussen met water is in een ruimte met zoveel stroomvoorzieningen niet verstandig, blussen met poederblussers betekent dat je daarna de servers weg kan gooien om de elektrische componenten aangetast worden, dus de beste manier om een

serverruimte te blussen is door de zuurstof weg te halen. Een datacentrum wordt bij brand dan ook vaak volgepompt met bijvoorbeeld CO₂.

Het weg halen van de zuurstof is een prima methode om een brand te blussen, voor mensen is dit echter heel vervelend. Je moet bij een alarm dan ook binnen de gestelde tijd de serverruimte hebben verlaten om te voorkomen dat je omkomt door een te kort aan zuurstof.

Hoofdstuk 7

Onderhoud

Een goed onderhouden datacenter kent minder verstoringen en dus minder kans op downtime. De handleidingen bij de geleverde onderdelen in het datacenter bevatten vaak goed instructies en tips voor het onderhoud van de apparatuur. Een goed beheerd datacenter heeft op basis van deze handleidingen procedures die uitgevoerd moeten worden zodat er bijvoorbeeld regelmatig getest wordt op mogelijke defecten of waarbij de status van apparatuur op vaste tijdstippen gecontroleerd wordt. Het is dan ook van het grootste belang dat deze documentatie bijgehouden wordt en gebruikt wordt om het onderhoud uit te voeren.

7.1 Soorten onderhoud

De inspectie en het onderhoud van een datacenter is veelal mensen werk. De belangrijkste stappen zijn:

inspectie Het regelmatig visueel of met tools in de gaten houden van de apparatuur en de bekabeling

voorspelbaar onderhoud (predictive maintenance) onderhoud dat je aan kan zien komen door voldoende monitoring en het in de gaten houden van trends als gevolg van de monitoring

preventief onderhoud onderhoud volgens het onderhoudsplan, zoals het vervangen van filters

correctief onderhoud het bijtijds vervangen van apparatuur die end-of-life wordt en het corrigeren van reeds ontstane problemen zoals lekages, corrosie op leidingen, etc.

7.2 Stof

De luchtcirculatie die voor de koeling zorgt heeft meestal filters die stof uit de lucht filteren, deze moeten met enige regelmaat vervangen worden.

Via de toegang tot de serverruimte en van de kleding van beheerders komt er toch stof in een ruimte. Stof kan zich ophopen en zorgen voor een blokkade van de luchtstroom of kan gevoelige apparatuur afdekken waardoor oververhitting ontstaat. De ruimte moet dan ook regelmatig schoongemaakt worden en ook de apparatuur moet gecontroleerd worden op stof en waar nodig schoon gemaakt worden.

7.3 Blusmiddelen

Brandblussers in een datacenter moeten minimaal één keer per jaar nagelopen worden op vulling en eventuele beschadigingen.

7.4 Koeling

Naast de controle van de temperatuursensoren, ter controle van de algehele temperatuur in het datacenter, is van belang om ook de racks te controleren op hot-spots. Een hot-spot is een plek in de serverruimte die meer warmte genereert dan een andere. Dit kan gebeuren omdat in bijvoorbeeld een rekencluster een aantal machines zijn toegewezen aan een rekenintensieve taak. Op deze manier kan een, tijdelijke, plek in de serverruimte ontstaan die extra warm wordt. Als de extra warmte van korte duur is kan het meestal niet zo veel kwaad, als het structureel is dan zullen er maatregelen genomen moeten worden.

7.5 Voeding

Meestal één keer per jaar zal een datacenter getest moeten worden op de werking van de noodstroomvoorziening. De hoofdspanning wordt afgeschakeld, de UPS moet de tijdelijke voorziening opvangen en de generator moet gestart worden.

Om te voorkomen dat men voor verrassingen komt te staan is het goed om voordat de bovenstaande procedure doorlopen wordt eerst te testen of de generator het doet, of er voldoende brandstof is en of deze aangaat als het systeem daarom vraagt.

Ook het UPS-systeem moet voor de grote test gecontroleerd zijn. Het is vooral bij een UPS met batterijen van belang dat de conditie van de batterijen regelmatig nagekeken wordt en dat slechte batterijen vervangen worden.

7.6 Veiligheid

Ook de toegangsbeveiliging moet regelmatig gecontroleerd worden op het functioneren. Vallen alle deuren keurig in het slot? Sluiten de deuren van de racks? Werken de nooddeuren en kan men er veilig naar buiten in geval van een calamiteit?

Het is ook van belang dat de lijst met personen die toegang heeft regelmatig nagekeken wordt. Heeft iedereen die op de lijst staat de rechten nog wel nodig?

7.7 Component controle

Switches, routers, bekabeling, harddisk, etc. moeten allemaal onderhouden en gecontroleerd worden. Failover netwerken en servers moeten getest worden en de conditie van de apparatuur moet nagelopen worden. Harddisks moeten met S.M.A.R.T. in de gaten gehouden worden en bij voorkeur vervangen worden voordat ze uitvallen.

Index

- 2N, 23
- 2N+1, 24
- Adiabatische koeling, 20
 - Indirect, 20
- Airco, 20
- Batterijen, 16
 - Onderhoud, 31
- Bekabeling, 10
- Blade servers, 7
- Blusmiddelen
 - Onderhoud, 30
- Brandbeveiliging, 26
- Cabinets, 5
- Camera, 26
- CO₂, 27
- Compressor, 20
- Datacenter, 1
 - Brandbeveiliging, 26
 - DER, 2
 - Fysieke beveiliging, 26
 - Koeling, 19
 - Luchtvochtigheid, 20
 - MER, 2
 - SER, 2
 - Temperatuur, 20
 - Types, 2
- DER, 2
- Distributie Paneel, 17
- Distribution Equipment Room, 2
- Elektriciteitsnet, 15
- Fysieke beveiliging, 26
- Generator, 17
 - Onderhoud, 30
- Hiërarchisch Netwerk Ontwerp, 10
- HND, 10
- Hot-spots, 30
- Hygrometer, 26
- Indirecte adiabatische koeling, 20
- Infraroodsensoren, 26
- Internet Service Provider, 1
- ISP, 1
- Kasten, 5
- Koeling
 - Adiabatische koeling, 20
 - Airco, 20
 - Datacenter, 19
 - Onderhoud, 30
- Luchtfilters
 - Onderhoud, 30
- Luchtvochtigheid, 20
 - Meter, 26
- Main Distribution Board, 15, 17
- Main Equipment Room, 2
- MDB, 15, 17
- MER, 2

- N, 23
- N+1, 23
- Noodstroom
 - Onderhoud, 30
- Onderhoud, 29
 - Batterijen, 31
 - Blusmiddelen, 30
 - Generator, 30
 - Koeling, 30
 - Luchtfilters, 30
 - Noodstroom, 30
 - Stof, 30
 - UPS, 30
 - Voeding, 30
- Paslezer, 26
- Patchpaneel, 9
- PCM, 21
- PDU, 5
- Phase Change Material, 21
- Poederblusser, 26
- Power Distribution Unit, 5
- Power strip, 5
- Power Usage Effectiveness, 17
- PUE, 17
- Redundantie, 23
 - 2N, 23
 - 2N+1, 24
 - 3N/2, 24
 - 4N/3, 24
 - N, 23
 - N+1, 23
 - xNy, 24
- Rookmelder, 26
- Satellite Equipment Room, 2
- SER, 2
- Serverruimte, 1
- Temperatuur
 - Datacenter, 20
- Temperatuursensor, 26, 30
- TIA-942, 24
- Tier-1, 25
- Tier-2, 25
- Tier-3, 25, 26
- tiering, 24
- Toegangscontrole, 26
- Uninterruptable Power Supply, 15
- Uninterruptable Power Supply, 16
- UPS, 15, 16
 - Batterijen, 16
 - Onderhoud, 30
 - Vliegwiél, 16
- Verhoogde voer, 3
- Vliegwiél, 16
- Vloeistofkoeling, 21
- Vloer, 3
 - Verhoogde, 3
- Voeding
 - Elektriciteitsnet, 15
 - Generator, 17
 - Hoogspanning, 15
 - Onderhoud, 30
- xNy, 24