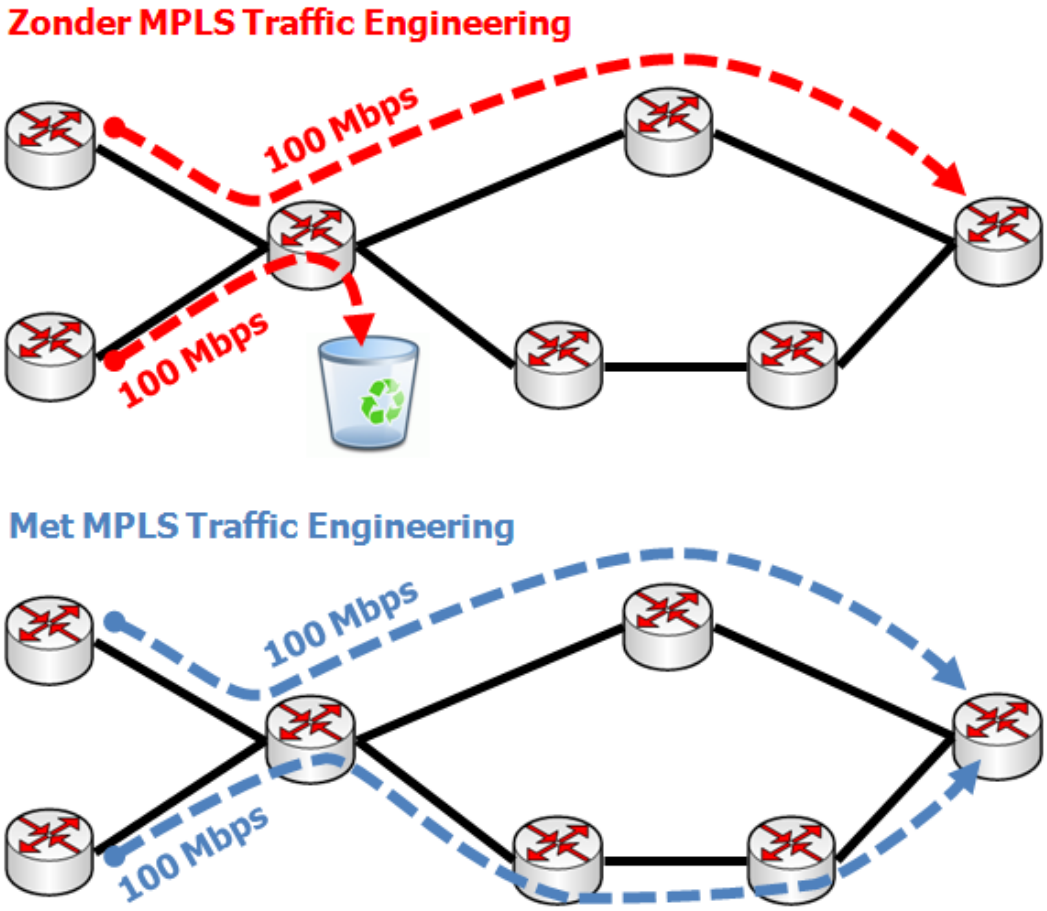
Afstudeerdossier:

Hoe kunnen Traffic Engineering technieken worden ingezet voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?



Versie: 1.0 Definitief

Auteur:Sebastiaan van de Grint (studentnummer 4401)

Opdrachtgever: Richard Schmidt
Blok: TI-dt G3 Afstuderen

Den Haag, 29 maart 2010

Afstudeerdossier: Hoe kunnen Traffic Engineering technieken worden ingezet voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?

1. Procesverslag

Incl. wijze van aantonen competentieset

2. Afstudeerplan

3. Onderzoeksplan

4. Onderzoeksrapport

5. Selectie literatuur

6. Netwerkconfiguratie

7. Testrapportage

8. Stand van Zaken

9. (Tussentijdse) Beoordelingen

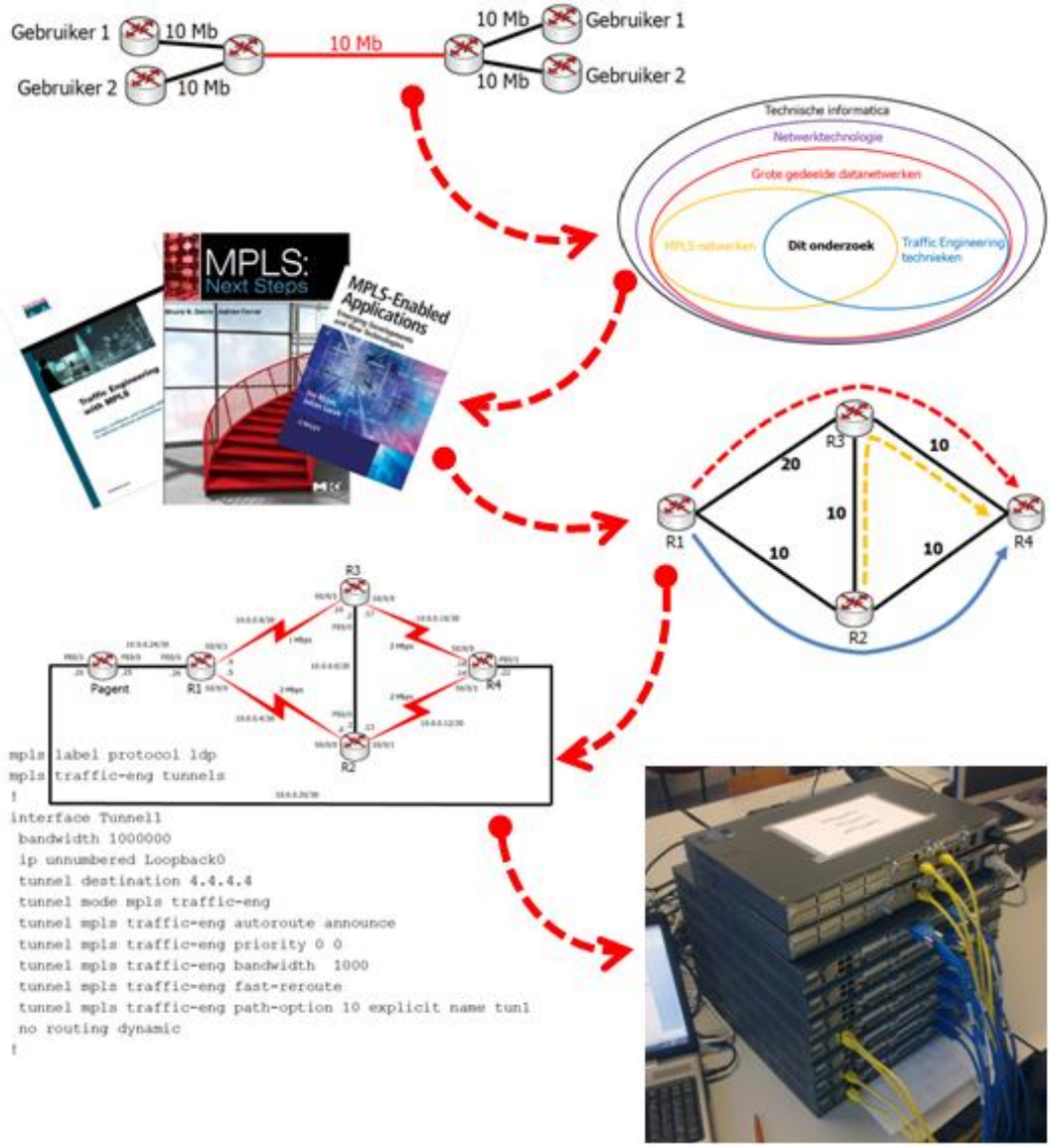
Versie: 1.0 Definitief

Auteur:Sebastiaan van de Grint
(studentnummer 4401)

Opdrachtgever: Richard Schmidt
Blok: TI-dt G3 Afstuderen

Den Haag, 29 maart 2010

Procesverslag: Hoe kunnen Traffic Engineering technieken worden ingezet voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?



Versie: 1.0 Definitief

Auteur:Sebastiaan van de Grint (studentnummer 4401)

Opdrachtgever: Richard Schmidt
Blok: TI-dt G3 Afstuderen

Den Haag, 29 maart 2010

Referaat

Titel: Hoe kunnen Traffic Engineering technieken worden ingezet voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?

Auteur: Sebastiaan van de Grint (studentnummer 4401)

Omschrijving: Dit rapport beschrijft een onderzoek naar de mogelijkheden van MPLS Traffic Engineering technieken. Dat zijn technieken waarmee de route die een datapakketje door een MPLS netwerk volgt, beïnvloed kan worden. Zonder deze technieken volgt al het dataverkeer de route die het routing protocol bepaalt, wat normaal gesproken overeenkomt met de kortste route. Met deze technieken is het mogelijk om het dataverkeer een andere route dan de kortste te laten nemen. De technieken kunnen worden ingezet voor Load Sharing doeleinden: het verdelen van het dataverkeer over verschillende routes van A naar B met een ongelijke cost. Voor Quality of Service doeleinden: het bereiken van een lage end-to-end delay. Voor Recovery en Protection doeleinden: het beperken van dataverlies (minder dan 50 ms) bij uitval router of verbinding, door razendsnelle backup routes. Al deze toepassingen zorgen voor een effectievere benutting van een netwerk met standaard routering. Dit onderzoek bevat zowel een theoretisch deel als een Proof of Concept middels praktijktesten.

Keywords: MPLS, Traffic Engineering, netwerkoptimalisatie, DiffServ, QoS

Voorwoord

In het kader van het afstuderen van mijn studie Technische Informatica aan de Haagse Hogeschool heb 17 weken gewerkt aan dit onderzoek naar de mogelijkheden van MPLS Traffic Engineering. Ik heb me met heel veel plezier verdiept in de literatuur van dit interessante vakgebied. Ook het bouwen van de testopstellingen en het uitvoeren van de praktijktesten was erg leuk en leerzaam.

Ik wil mijn begeleider examinator Bart Jan Koning bedanken voor het meedenken over de juiste opzet van dit onderzoek en voor de concrete en helder feedback die ik gedurende het gehele traject heb gekregen. Ook wil ik mijn expert examinator Hans Witkamp bedanken voor de vele goede adviezen tijdens mijn afstudeertraject en voor het regelen van de sleutel van het Ciscolab, waarmee ik onbeperkt toegang had tot de praktijkruimte. Richard Schmidt wil ik bedanken voor het feit dat hij geheel belangeloos de rol van opdrachtgever en bedrijfsbegeleider op zich heeft genomen en de daarbij horende kritische blik op de opgeleverde documenten. Richard Arends wil ik bedanken voor het aanleveren van de Pagent handleiding, zonder deze handleiding waren de testen nooit binnen zo'n korte tijd geslaagd. Ten slotte wil ik mijn vriendin Renske bedanken, zonder haar steun was het niet mogelijk geweest om het afstuderen naast mijn werk in 17 weken af te ronden.

Inhoudsopgave Pagina

1. Inleiding

Dit procesverslag beschrijft het proces tijdens mijn onderzoek naar de mogelijkheden van MPLS Traffic Engineering technieken. Dat zijn technieken waarmee de route die een datapakketje door een MPLS netwerk volgt, beïnvloed kan worden. Zonder deze technieken volgt al het dataverkeer de route die het routing protocol bepaalt, wat normaal gesproken overeenkomt met de kortste route. Met deze technieken is het mogelijk om het dataverkeer een andere route dan de kortste te laten nemen. Dit onderzoek gaat in op de mogelijkheden van die technieken en dan met name op de mogelijkheden die deze technieken bieden om een netwerk effectiever te benutten (dan een netwerk met standaard routering). Ik heb daarbij zowel voor een theoretische benadering door middel van een literatuurstudie als voor een praktische benadering in de vorm van een 'Proof of Concept' gekozen. Bij het Proof of Concept gedeelte heb ik middels praktijktesten onderzocht of een testnetwerk met MPLS Traffic Engineering technieken inderdaad effectiever benut wordt dan zonder die technieken.

In hoofdstuk 2 is mijn opdrachtomschrijving te vinden, deze bestaat uit de aanleiding, probleemstelling, doelstelling en resultaat. Dit geeft een algemeen beeld van mijn onderzoek. Hoofdstuk 3 gaat in op de onderzoeksmethodiek van Oost & Markenhof (2002) die ik gebruikt heb tijdens dit onderzoek en de reden dat ik voor deze methodiek gekozen heb. De onderzoeksmethodiek die ik gebruikt heb, deelt het onderzoek op in vier delen. Hoofdstuk 4 gaat over het proces van de eerste onderzoeksfase 'onderzoek voorbereiden'. Belangrijkste onderdelen hiervan zijn de probleemstelling, de onderzoeksstrategie en de vertaling hiervan in onderzoeksactiviteiten. Hoofdstuk 5 behandelt het proces tijdens de tweede onderzoeksfase 'materiaal verzamelen'. Dit hoofdstuk richt zich vooral op het zoeken van de literatuur. De derde fase is 'materiaal analyseren', het proces van deze fase komt aan bod in hoofdstuk 6. Hoofdstuk 7 beschrijft het proces van de laatste onderzoeksfase 'rapporteren'. In hoofdstuk 8 het subonderzoek 'Proof of Concept' beschreven. Dit subonderzoek gaat over de uitgevoerde praktijktesten. Hoofdstuk 9 behandelt de conclusie van het onderzoek en de aanbevelingen voor vervolgonderzoek. De procesevaluatie wordt in hoofdstuk 10 besproken. Hierin wordt besproken of het proces conform de planning is verlopen, welke problemen er optraden en welke lessen hieruit geleerd kunnen worden. Hoofdstuk 11 beschrijft ten slotte de productevaluatie. Welke producten heeft dit onderzoek opgeleverd en voldoen die producten aan de verwachtingen die op basis van het onderzoeksplan geschept zijn. In bijlage 2 wordt beschreven hoe de competenties aangetoond zijn.

Bij de beschrijving van de meeste activiteiten, geef ik eerst aan welke stappen ik doorlopen heb tijdens deze activiteit. De activiteiten bestaan als het goed is uit een logische aaneenschakeling van stappen. Ik benoem in veel gevallen eerst de stap om daarna de letterlijke tekst (uit bijvoorbeeld het onderzoeksplan) te geven, waarmee ik die stap heb verwoord. De letterlijke tekst is dan altijd *schuin gedrukt*. Dit is dus een uitgebreide beschrijving van de stappen met veel voorbeelden. Daarin maak ik duidelijk wat ik heb gedaan, hoe ik dat heb gedaan en waarom ik het (op die manier) heb gedaan.

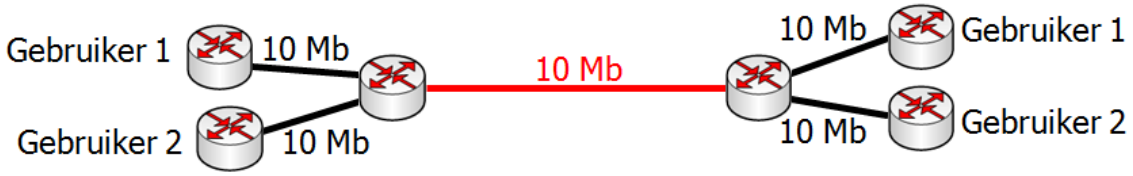
Ontbreken beschrijving organisatie en aanvangssituatie

Ik heb dit onderzoek volledig zelfstandig opgezet en uitgevoerd, het onderzoek is dus niet bij een bedrijf uitgevoerd. Vanwege deze afwijkende situatie ontbreekt een beschrijving van de organisatie en de situatie bij aanvang van het afstuderen. Deze onderdelen zijn immers niet van toepassing op mijn onderzoek.

2. Onderzoeksopdracht

2.1 Aanleiding

Heel veel grote datanetwerken, zoals bijvoorbeeld een groot aantal Internet Service Provider (ISP) netwerken, zijn gedeeld. Met gedeeld wordt bedoeld dat de capaciteit van het netwerk door verschillende gebruikers gedeeld wordt. Gedeelde netwerken zijn vrijwel altijd overboekt, wat inhoudt dat er meer verkeer naar het netwerk kan, dan er over het netwerk getransporteerd kan worden. Stel dat een netwerkverbinding van 10 Mbit gedeeld wordt door 2 gebruikers dan heet dat een 1:2 overboeking, figuur 1 laat dit zien. Beide gebruikers hebben een 10 Mbit verbinding (zwarte lijnen) naar de netwerkverbinding (rode lijn). Als gebruiker 2 de verbinding niet gebruikt, heeft gebruiker 1 de volledige 10 Mbit ter beschikking. Bij gelijktijdig gebruiker krijgen beide gebruikers 5 Mbit. Voordeel van het overboeken is dat beide gebruikers de kosten voor de verbinding delen en dus als het ware betalen voor een 5 Mb verbinding, terwijl zij gedurende een gedeelte van de tijd 10 Mb ter beschikking hebben.



Figuur 1. 10 Mb netwerkverbinding die door 2 gebruikers gedeeld wordt (1:2 overboeking).

Het voorbeeld is voor één netwerkverbinding met twee gebruikers, maar hetzelfde principe wordt toegepast op grote netwerken met vele gebruikers. Door de overboeking is het onvermijdelijk dat er op een gegeven moment congestion (opstopping) op bepaalde verbindingen ontstaat. Zodra gebruiker 1 en 2 beide 10 Mbit naar de verbinding sturen komt er 20 Mbit aan terwijl er maar 10 Mbit over de verbinding kan. In dat geval is er dus sprake van congestion.

In het geval van congestion spelen twee verzamelingen van technieken een belangrijke rol, te weten Quality of Service (QoS) en Traffic Engineering (TE). QoS zorgt ervoor dat belangrijker verkeer voorrang krijgt tijdens congestion. QoS regelt alleen de prioritering van het dataverkeer op één verbinding, namelijk de verbinding waar op dat moment congestion optreedt. QoS regelt het dataverkeer dus alleen lokaal. Traffic Engineering zorgt voor het omleiden van dataverkeer tijdens congestion en een betere verdeling van het dataverkeer over alle beschikbare verbindingen. Traffic Engineering is dus een verzameling technieken die bedoeld zijn om het verkeer op het gehele netwerk te regelen. Hoewel QoS en Traffic Engineering dus beiden van toepassing zijn bij congestion, zijn het twee compleet verschillende takken van sport. Beiden kunnen zowel los als naast elkaar worden toegepast.

Mede omdat MPLS (Multiprotocol Label Switching) een goede implementatie van QoS en Traffic Engineering mogelijk maakt, is de populariteit van MPLS netwerken enorm toegenomen. Vrijwel alle grote ISP's hebben een MPLS netwerk, een voorbeeld is het KPN Epacity netwerk (MPLS-VPN).

MPLS als label-switching techniek en MPLS-VPN als netwerk met (Virtual Private Network) VPN service zijn de enige MPLS onderdelen die behandeld zijn tijdens de CCNP colleges op de Haagse Hogeschool (HHS). MPLS QoS is aan bod gekomen bij onderzoeken die door de afstudeerder uitgevoerd zijn tijdens de blokken TI5 en TI7 aan de HHS.

2.2 Probleemstelling

Omdat de afstudeerder geen kennis van en ervaring met MPLS Traffic Engineering heeft, dient de volgende vraag gesteld te worden: hoe kunnen Traffic Engineering technieken worden ingezet voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?
Om tot een antwoord op deze vraag te komen, zullen de onderstaande deelvragen beantwoord moeten worden:

1. Wat is een MPLS netwerk?
2. Wat is Traffic Engineering?
3. Welke MPLS Traffic Engineering technieken zijn er?
4. Welke mogelijkheden bieden de MPLS Traffic Engineering technieken?
5. Welke criteria bepalen de effectiviteit van de benutting van een (MPLS) netwerk?
6. Hoe effectief wordt een MPLS netwerk zonder Traffic Engineering technieken benut?
7. Hoe zouden de gevonden Traffic Engineering technieken bij kunnen dragen aan het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?
8. Hoe zou het effectiever benutten van het netwerk door toepassing van deze technieken in de praktijk getest kunnen worden?
9. Welk netwerk is nodig voor zo'n praktijktest?
10. Zorgen deze technieken in de praktijk inderdaad voor een effectievere benutting van het netwerk?

2.3 Doelstelling

De eerste vraag heeft als doel de lezer inzicht te geven in de globale werking van een netwerk waarbij MPLS wordt toegepast om datapakketjes te switchen. De tweede vraag geeft zowel de lezer als de afstudeerder inzicht in het begrip Traffic Engineering in het algemeen, wat behoort wel en wat behoort niet tot Traffic Engineering. Het doel van de derde vraag is om vast te stellen welke MPLS Traffic Engineering technieken er zijn. Vraag 4 heeft als doel de lezer en de afstudeerder kennis te verschaffen over de mogelijkheden van de MPLS Traffic Engineering technieken. De vijfde vraag geeft de lezer en afstudeerder inzicht in de factoren die de effectieve benutting van een MPLS netwerk bepalen. Vraag 6 heeft als doel voor de lezer en de afstudeerder om de referentiesituatie met standaard routering helder te maken. Het doel van vraag 7 is om de lezer en afstudeerder inzicht te geven in de manier waarop deze technieken bij zouden kunnen dragen aan een effectievere benutting van het netwerk. Vraag 8 heeft als doel voor de lezer en de afstudeerder in kaart te brengen op welke manier in de praktijk getest kan worden of deze technieken het netwerk inderdaad effectiever benutten dan een netwerk zonder deze technieken. De afstudeerder doet daarnaast ook ervaring op in het bepalen en het vastleggen van de eisen aan een testnetwerk. De negende vraag is enerzijds bedoeld om de afstudeerder ervaring op te laten doen met het vertalen van de eisen aan het testnetwerk in een netwerkontwerp waarin MPLS Traffic Engineering technieken worden toegepast. En anderzijds om ervaring op te doen met het daadwerkelijk bouwen van het ontworpen netwerk en het toepassen van de geleerde

technieken. Doel van vraag 10 is voor de afstudeerder het opdoen van ervaring in het analyseren van testresultaten en het verbinden van conclusies aan deze testresultaten. Daarnaast geeft deze vraag de lezer en de afstudeerder inzicht in de werking van de technieken in de praktijk ten aanzien van het effectiever benutten van het netwerk.

De hoofdvraag geeft de lezer en de afstudeerder kennis van en inzicht in de manier waarop MPLS Traffic Engineering technieken kunnen worden ingezet voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk. De afstudeerder doet naast kennis en inzicht ook nog praktijkervaring op in het toepassen van de technieken.

2.4 Resultaat

Het belangrijkste resultaat is een onderzoeksrapport. In het rapport zal worden uitgelegd wat MPLS netwerken zijn en wat Traffic Engineering is. In het rapport zal tevens beschreven worden welke specifieke MPLS Traffic Engineering technieken er zijn en wat de mogelijkheden van deze technieken zijn. Daarna wordt vastgelegd welke criteria bepalen hoe effectief een MPLS netwerk benut wordt. Vervolgens wordt in het rapport ingegaan op de mate waarin een MPLS netwerk effectief benut wordt in de referentiesituatie met standaard routering. Uiteraard zal in het rapport ook worden ingegaan op de manier waarop deze technieken zouden kunnen bijdragen aan het effectiever benutten van een MPLS netwerk. Er zal worden beschreven hoe de effectiviteit van deze technieken in de praktijk getest zou kunnen worden. De ontwerpen van de testnetwerken zullen ook worden opgenomen in de rapportage. Het rapport wordt afgesloten met een conclusie, waarin de hoofdvraag beantwoord zal worden. De configuratiefiles van de daadwerkelijk gebouwde netwerken en het testplan met een beschrijving van de (resultaten van de) praktijktesten zullen als bijlage worden toegevoegd aan de rapportage. Naast het onderzoeksrapport wordt een afstudeerverslag met daarin de procesbeschrijving van het gehele afstudeertraject opgeleverd.

3. Keuze onderzoeksmethodiek

Voordat ik aan mijn onderzoek begon moest ik een onderzoeksmethodiek kiezen. Tijdens mijn studie heb ik kennisgemaakt met twee onderzoeksmethodieken. De eerste is een methodiek die door Heinze Oost in vier boeken beschreven wordt. Tijdens onderwijsblok T5 heb ik de eerste twee delen, 'een onderzoek voorbereiden' en 'een onderzoek uitvoeren' gebruikt. De andere twee delen gaan over het rapporteren en het presenteren van een onderzoek, deze twee delen zijn in T5 niet behandeld. De tweede methodiek is van Nel Verhoeven en wordt beschreven in 'Wat is onderzoek?'. Dit boek is voor een groot deel behandeld in onderwijsblok T7, waarin les werd gegeven over kwalitatief en kwantitatief onderzoek. Deze twee methodieken heb ik met elkaar vergeleken om te bepalen welke het meest geschikt voor mijn onderzoek is.

Het eerste opvallende verschil tussen beide boeken is dat Oost meer gericht is op technisch wetenschappelijk onderzoek en Verhoeven meer op praktijkonderzoek. In Verhoeven wordt veel aandacht besteed aan enquêtes, interviews, observatieonderzoek. Tevens gaat een groot deel van het boek over de statistiek die komt kijken bij kwantitatief onderzoek. Oost daarentegen richt zich in deel 1 vrijwel geheel op het opstellen van een goede probleemstelling. In deel 2 gaat Oost met name in op de kwaliteitseisen aan de antwoorden op de (deel)vragen, welke fouten er invloed op de kwaliteitseisen hebben en hoe je ervoor kunt zorgen dat jouw antwoorden aan die eisen voldoen. Tweede verschil is de meer theoretische insteek van Verhoeven tegenover de meer praktische benadering door Oost. Ik doel daarbij vooral op de vele tientallen definities van onderzoeksbegrippen in Verhoeven, terwijl Oost vrijwel nergens definities geeft en meer praktisch verteld wat er gedaan moet worden. Verhoeven geeft wel veel praktijkvoorbeeld, waarbij er uitgelegd wordt wat er mis gaat. Maar er wordt minder vaak concreet en praktisch aangegeven hoe je het zelf moet doen. Hoewel veel begrippen en definities vaak helpen om beter inzicht te krijgen in het vakgebied, is dat voor mijn onderzoek minder van toepassing. Dat komt vooral om het ook nu veel begrippen over enquêtes, interviews en statistiek zijn en daar heb ik met dit onderzoek niet zo veel aan. Deze beide verschillen vallen voor mijn onderzoek uit in het voordeel van Oost. Mijn onderzoek is technisch wetenschappelijk van aard en heeft weinig van doen met enquêtes, interviews en statistiek. De praktische en concrete insteek van Oost is mij bij het gebruik van de methode in TI5 erg goed bevallen. Door deze werkwijze te volgen, ben ik beter in staat om een goede probleemstelling te formuleren. Bovendien geeft het boek handvatten waarmee ik zelf kan controleren of ik een goede probleemstelling heb geformuleerd.

Er was ook nog de optie om een andere onderzoeksmethodiek te zoeken dan Oost of Verhoeven. Nadeel hiervan is dat het zoeken naar en leren toepassen van een andere methodiek veel tijd kost. Hierdoor houd ik minder tijd over voor andere onderdelen, waardoor de kwaliteit van andere onderdelen achteruit gaat. Bovendien is het van te voren lastig is in te schatten hoe geschikt de methodiek is. Zelfs als de methodiek geschikter blijkt dan Oost dan weet ik dat pas na afloop. Ik had dus enerzijds de methodiek van Oost, die ik erg prettig vond werken en waarvan ik het idee heb dat de methodiek geschikt is voor dit onderzoek. En anderzijds een methodiek waarin ik veel tijd moet investeren en waarvan ik van te voren niet weet of de methodiek geschikt is. Op grond van deze redenen heb ik ervoor gekozen om de methodiek van Oost te gebruiken.

4. Projectfase: onderzoek voorbereiden

Zoals beschreven in hoofdstuk 3 hanteer ik voor mijn onderzoek de methodiek van Heinze Oost. Het eerste van de vier delen gaat over de eerste fase 'onderzoek voorbereiken' en is geschreven door Oost & Markenhof (2002). Op pagina 11 wordt gesteld dat het voorbereiden van een onderzoek moet leiden tot een onderzoeksplan, waarbij het opstellen van de probleemstelling verreweg het belangrijkste is. Ik heb deze methodiek gevolgd, wat geleid heeft tot een onderzoeksplan met de onderdelen zoals aangegeven in Oost & Markenhof (2002, p.67). De tabel hieronder laat zien waar het proces van de onderdelen uit het onderzoeksplan in dit verslag terug te vinden zijn.

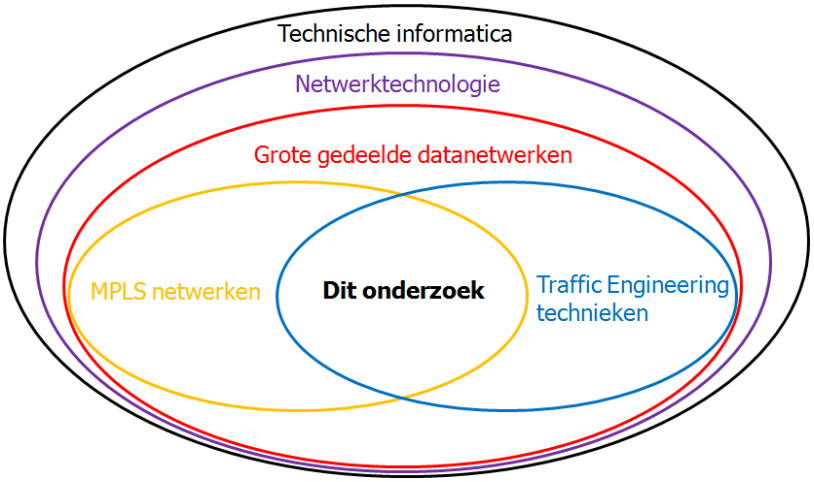
Onderdeel onderzoeksplan	**Hoofdstuk van dit verslag**
Probleemstelling	4.1 Probleemstelling
Verantwoording	4.1 Probleemstelling, kopje 'Relevantie'
Theoretische kader	4.1 Probleemstelling, kopje 'Verankering'
Onderzoekstrategie	4.2 Onderzoekstrategie
Activiteiten & planning	4.3 Activiteiten

4.1 Probleemstelling

De probleemstelling dient volgens Oost & Markenhof (2002, p. 14) verankerd, relevant, precies, functioneel en consistent te zijn. Ik heb de in dit boek beschreven methode gevolgd om mijn probleemstelling aan deze eisen te laten voldoen. De genoemde eisen komen één voor één aan bod.

Verankering

De verankering van mijn probleemstelling heb ik in mijn onderzoeksplan onder het kopje 'Theoretisch kader' beschreven. Zowel in woorden als in een schematische figuur. Ik heb voor de figuur gekozen omdat deze in een oogopslag aangeeft binnen welke deelgebieden van de Technische Informatica dit onderzoek zich afspeelt.



Figuur 2. Schematische weergave van het theoretisch kader van dit onderzoek

Relevantie

Ik heb onderbouwd waarom dit onderzoek relevant is onder het kopje 'Verantwoording' in mijn onderzoeksplan. Ik ben begonnen met het belangrijkste doel dat ik wil bereiken met het onderzoek: *het opdoen van kennis en ervaring met het toepassen van Traffic Engineering technieken voor het effectiever benutten van MPLS netwerken met standaardroutering.* Het doel geeft aan dat het onderzoek vooral theoretisch en praktisch relevant is voor mijn persoonlijke ontwikkeling. Ik benadruk daarbij dat het een leeronderzoek is en waar de focus van het onderzoek ligt: *Het onderzoek is dan ook bedoeld als leeronderzoek voor de afstudeerder. De nadruk van het onderzoek ligt vooral op het verkennen en vastleggen van de mogelijkheden van Traffic Engineering in MPLS netwerken en niet zozeer op nieuwe toepassingen of inzichten.* Om vervolgens aan te geven waarom mijn onderzoeksrapport interessant zal zijn om te lezen, dit punt benadrukt de praktische relevantie voor anderen van mijn onderzoek. *Het onderzoeksrapport zal qua omvang en diepgang het midden houden tussen een artikel en een boek. Daardoor zal de lezer die zich wil oriënteren op dit gebied een veel uitgebreider beeld krijgen van de mogelijkheden van de technieken dan in een artikel. De goed gedocumenteerde praktijktesten zullen daarbij een mooie aanvulling zijn.* Als afsluiting heb ik mijn persoonlijke motivatie voor het onderzoek toegevoegd.

Precisie

Hoofdstuk 4 van Oost & Markenhof (2002) gaat in op de precisie van de probleemstelling. Er wordt gesteld dat het belangrijk is dat je zo precies mogelijk aangeeft wat je eigenlijk wilt weten. Hierdoor voorkom je enerzijds dat het resultaat van het onderzoek niet is wat je zocht en anderzijds krijgen anderen een veel beter beeld wat je gaat doen en te weten wilt komen.

Omdat dit onderzoek een zelf opgezet onderzoek is, kon ik zelf bepalen op welk kennisgebied ik mijn onderzoek wilde doen. Met het bepalen van mijn onderzoeksgebied heb ik de eerste stappen gezet om mijn probleemstelling preciezer te maken. Tijdens de onderzoeken van onderwijsblok T5 en T7 is mijn interesse gewekt voor MPLS netwerken. Ik heb dus gezocht naar een onderwerp dat te maken had met MPLS netwerken. Bij deze zoektocht kwam ik een boek tegen over het toepassen van Traffic Engineering technieken in MPLS netwerken. De inleiding van dat boek leerde mij dat Traffic Engineering technieken ingezet kunnen worden om een netwerk effectiever te benutten. Ook dat aspect vond ik zeer interessant, mijn onderzoeken in T5 en T7 waren ook gericht op het effectiever benutten van een bestaand netwerk, maar dan met Quality of Service technieken. Ik wilde dus een onderzoek doen naar de inzet van Traffic Engineering technieken binnen MPLS netwerken. De inperking is schematisch weergegeven in figuur 2.

Het onderzoeksgebied lag daarmee vast, daarna heb ik gekeken wat is zelf wilde bereiken met het onderzoek. Ik wilde enerzijds theoretische kennis opdoen op dit gebied, daarmee had ik bijvoorbeeld de vraag kunnen stellen:

- Welke mogelijkheden bieden MPLS Traffic Engineering technieken voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?

Anderzijds wilde ik praktische kennis opdoen en een Proof of Concept geven. Daarmee toon ik aan dat de technieken ook daadwerkelijk werken en dat ik de theorie begrepen heb. Het Proof of

Concept is dus ook een belangrijk aspect. Voor het praktijkdeel had ik bijvoorbeeld de vraag kunnen stellen:

- Zorgt de inzet van MPLS Traffic Engineering technieken er in de praktijk inderdaad voor dat een netwerk met deze technieken effectiever benut wordt dan een netwerk met standaard routering?

In dit stadium heb ik overleg gehad met mijn begeleider Bart Jan Koning. Uit dit overleg is naar voren gekomen dat beide vragen het best verenigd kunnen worden door er één ontwerpvraag (daar bedoel ik een vraag mee die hoort bij het onderzoekstype 'ontwerpen') van te maken. Daaruit is de uiteindelijke probleemstelling gekomen:

- Hoe kunnen Traffic Engineering technieken worden ingezet voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?

In Oost & Markenhof (2002, p.42-43) wordt gesteld dat een probleemstelling precies genoeg is als de vraag duidelijkheid verschaft over het domein, de variabelen en de eventuele scores op variabelen. Mijn domein is 'MPLS netwerken met standaard routering'. Over deze netwerken wil ik na afloop van mijn onderzoek uitspraken kunnen doen en wel hoe deze netwerken effectiever benut kunnen worden door de inzet van MPLS Traffic Engineering technieken. Het is uiteraard mogelijk dat ik na afloop moet concluderen dat mijn uitspraken niet voor alle MPLS netwerken geldt, maar dat kan ik van tevoren niet weten. De variabelen in mijn probleemstelling zijn:

1. MPLS Traffic Engineering technieken
2. de manieren waarop de MPLS Traffic Engineering technieken ingezet kunnen worden
3. de effectievere benutting van de MPLS netwerken met standaard routering

De bijbehorende scores zijn:

1. de namen van de verschillende MPLS Traffic Engineering technieken
2. de instellingen op routers (en mogelijk ook op andere netwerkapparatuur) die bepalen hoe de MPLS Traffic Engineering technieken zullen werken. Voor de praktijktesten zullen dit echte configuratiefiles zijn. Voor het theoretisch gedeelte zullen dit beschrijvingen zijn zoals 'op de router kan worden ingesteld dat …, waarmee het effect wordt bereikt dat …'
3. wel effectiever, niet effectiever, even effectief, x% effectiever, of x% minder effectief. Ik verwacht in ieder geval aan te kunnen geven in welke gevallen de MPLS netwerken met standaard routering wel effectiever benut worden, in welke gevallen niet en in welke gevallen er geen verschil is. Daarnaast hoop ik bij de praktijktesten te kunnen meten hoeveel % effectiever of minder effectief de netwerken met MPLS Traffic Engineering technieken zijn ten opzichte van de netwerken met standaard routering.

Ik denk dat ik het juiste domein, variabelen en mogelijke scores heb geformuleerd en dat ik mijn hoofdvraag daarmee voldoende precies heb gemaakt. Ik heb wel gecontroleerd of de vraag net nog preciezer kan. In dat geval zou ik me bijvoorbeeld kunnen richten op één MPLS Traffic Engineering techniek, één manier van inzetten van de technieken of het kwantificeren van de effectieve benutting (hoeveel effectiever). De eerste twee opties heb ik bewust af laten vallen omdat ik me breed wil oriënteren op de (mogelijkheden van) de technieken. De derde optie heb ik af laten vallen omdat ik dan al snel in een veel te wiskundig onderzoek terecht kom en dat is zeker

niet mijn doel. Het bepalen van de totale effectiviteit in een netwerk met honderden concurrerende datastromen is zeer complex.

Minder precies wil ik ook niet, bij de twee voorbeelden hieronder geef ik aan waarom ik dat niet wil. Twee voorbeelden waarmee ik probleemstelling (de hoofdvraag) preciezer heb gemaakt zijn:

1. de inzet van Traffic Engineering technieken. Ik had ook de meer algemene vraag kunnen stellen: Hoe kunnen MPLS netwerken effectiever benut worden? Deze meer algemene vraag kan echter ook als antwoord hebben dat ik het gedrag van gebruikers moet beïnvloeden om het netwerk effectiever te benutten. Of misschien wel dat ik Quality of Service technieken in moet zetten. Beide antwoorden zijn niet wat ik wil weten. Ik wil echt specifiek weten hoe ik Traffic Engineering technieken kan gebruiken voor het effectiever benutten.
2. MPLS netwerken. Ik stel de vraag specifiek voor MPLS netwerken. Dat voorkomt dat het antwoord straks bv. over ATM netwerken gaat, want daar ben ik niet in geïnteresseerd.

Naast de hoofdvraag bestaat de probleemstelling uit tien deelvragen. In mijn onderzoeksplan heb ik bij de 'doelstelling' per deelvraag aangegeven wat ik met die deelvraag wil bereiken. Dit stelt anderen in staat om te controleren of ik de juiste vraag heb gesteld. Hieronder geef ik per deelvraag nogmaals aan waarom ik de vraag stel:

1. Wat is een MPLS netwerk? Geeft een globaal beeld van de werking van MPLS netwerken. Dat zijn de netwerken waar het in dit onderzoek om draait. Dit is tevens de eerste stap van de afbakening van mijn onderzoeksgebied (oranje ovaal in figuur 2).
2. Wat is Traffic Engineering? Het onderzoek gaat over de inzet van Traffic Engineering technieken. Om het onderzoek te kunnen begrijpen is het belangrijk dat voor iedereen duidelijk is wat het begrip Traffic Engineering betekent, wat er wel en niet toe behoort. Hiermee zet ik de tweede stap van de afbakening van mijn onderzoeksgebied (blauwe ovaal in figuur 2).
3. Welke MPLS Traffic Engineering technieken zijn er? Nu duidelijk is wat een MPLS netwerk is en wat Traffic Engineering is, kan ik voor het eerst echt naar mijn onderzoeksgebied (aangegeven met 'dit onderzoek' in 2) gaan kijken. Deze vraag is bedoeld om duidelijk te maken wat de scores (de namen) van de eerste variabele (MPLS Traffic Engineering technieken) uit de hoofdvraag zijn.
4. Welke mogelijkheden bieden de MPLS Traffic Engineering technieken? Deze vraag geeft inzicht in de tweede variabele 'de manier waarop MPLS Traffic Engineering technieken kunnen worden ingezet' en de bijbehorende scores (de router instellingen).
5. Welke criteria bepalen de effectiviteit van de benutting van een (MPLS) netwerk? Deze vraag heb ik gesteld om te onderzoek en vast te leggen welke factoren invloed hebben op de effectiviteit van de benutting van een MPLS netwerk. Voordat ik een uitspraak kan doen over een effectievere benutting, dient voor iedereen helder te zijn welke factoren bepalen hoe effectief een netwerk benut wordt.
6. Hoe effectief wordt een MPLS netwerk zonder Traffic Engineering technieken benut? Middels de vorige vraag heb ik vastgelegd welke factoren de effectieve benutting van een MPLS netwerk bepalen. Bij deze vraag kijk ik aan de hand van deze factoren hoe effectief een MPLS netwerk zonder Traffic Engineering technieken benut wordt. Om uiteindelijk te kunnen

bepalen of een netwerk met MPLS Traffic Engineering technieken effectiever benut wordt, moet ik eerst weten hoe effectief een netwerk zonder die technieken benut wordt. Als ik dat niet weet kan ik beide netwerken niet vergelijken.

7. Hoe zouden de gevonden Traffic Engineering technieken bij kunnen dragen aan het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering? Deze vraag richt zich op de derde variabele in de hoofdvraag, namelijk de effectievere benutting van MPLS netwerken met standaard routering. Aan de hand van de antwoorden van deelvraag 4 en 6 bepaal ik in welke gevallen de MPLS netwerken met standaard routering wel effectiever benut worden, in welke gevallen niet en in welke gevallen er geen verschil is.
8. Hoe zou het effectiever benutten van het netwerk door toepassing van deze technieken in de praktijk getest kunnen worden? Een van de doelen van mijn onderzoek is om aan te tonen dat de MPLS Traffic Engineering technieken in de praktijk ook daadwerkelijk voor een effectievere benutting zorgen. Om dat aan te tonen heb ik één of meerdere testnetwerken nodig. Middels deze vraag wil ik de eisen vastleggen waaraan die testnetwerken moeten voldoen.
9. Welk netwerk is nodig voor zo'n praktijktest? Nadat ik de eisen heb vastgelegd, is de volgende stap op weg naar een testnetwerk een netwerkontwerp. Bij het beantwoorden van deze vraag vertaal ik de eisen van vraag 8 in één of meerdere netwerkontwerpen. De testnetwerken zal ik vervolgens ook echt bouwen.
10. Zorgen deze technieken in de praktijk inderdaad voor een effectievere benutting van het netwerk? Het antwoord op deze vraag is als het goed is mijn Proof of Concept. Ik verwacht hiermee aan te tonen dat MPLS netwerken met Traffic Engineering technieken effectiever benut worden dan MPLS netwerken met standaard routering. Daarnaast kan ik afhankelijk van de precieze uitvoering van de praktijktesten ook nog aangeven hoeveel effectiever de netwerken in deze testgevallen benut worden.

Functioneel

Volgens Oost & Markenhof (2002, p.15) is een onderzoeksvraag functioneel als de formulering van de vraag leidt tot een passende onderzoeksopzet. De onderzoeksopzet slaat daarbij op de zes onderzoeksfuncties die in hoofdstuk 5 van het boek genoemd worden. Mijn onderzoeksvraag is een typische ontwerpvraag. Als de aanpak van een ontwerponderzoek goed aansluit bij mijn onderzoekopzet, heb ik een functionele probleemstelling.

Oost & Markenhof (p. 52) geven aan dat 'We spreken van ontwerpen als een onderzoeker een maatregel of ingreep wil voorstellen, die ertoe moet leiden dat een probleem wordt opgelost, of een bestaande situatie wordt verbeterd. Een ontwerp berust op de evaluatie van een (probleem)situatie en de verklaring van de daarin aangetroffen problemen'. Ik evalueer ook probleemsituaties, namelijk MPLS netwerken met standaard routering. Ik zoek daarbij naar een verklaring voor het feit dat deze netwerken niet altijd even effectief worden benut. Tevens onderzoek ik de mogelijke maatregelen, in mijn geval zijn mogelijke maatregelen het inzet van MPLS Traffic Engineering technieken. De maatregelen moeten ertoe leiden dat de bestaande situatie verbeterd wordt, die verbetering is in mijn onderzoek een effectievere benutting van dat netwerk.

Ik denk dat deze onderzoeksopzet inderdaad de juiste opzet voor mijn onderzoek is. Onder het kopje 'precisie' heb ik per deelvraag uitgelegd waarom ik die deelvraag stel. Deze deelvragen zijn in feite de stappen (aanpak) van mijn onderzoek. Beantwoording van de deelvragen leiden, mijn inziens, tot een (goed) antwoord op de hoofdvraag. Mijn aanpak zou dus moeten leiden tot een goed antwoord op de hoofdvraag. Daarnaast komt mijn aanpak overeen met de opzet van een ontwerponderzoek. Daaruit concludeer ik dat een mijn onderzoeksvraag leidt tot een passende onderzoeksopzet en dus functioneel is.

Consistent

De consistentie wordt in Oost & Markenhof (2002, p.61) opgedeeld in twee soorten consistentie. De eerst is de consistentie tussen de vraag (probleemstelling) en de strategie, het kennisgebied enz. Deze vorm van consistentie is besproken bij de vier punten hiervoor (verankering, relevantie, precisie en functioneel). De tweede soort consistentie is de aansluiting tussen de vier punten onderling (bv. tussen relevantie en verankering). Op pagina 63 worden vragen gegeven waarmee de onderzoeker kan controleren of de genoemde punten onderling consistent zijn. Ik heb deze controlevragen gebruikt om de consistentie van mijn onderzoek te controleren. Een voorbeeld voor de consistentie tussen relevantie en functionaliteit, de controlevraag is: Leidt de onderzoeksfunctie tot een onderzoeksstrategie die de gewenste theoretische of praktische bijdrage oplevert? Gewenst is theoretische kennis van en praktische ervaring met het toepassen van Traffic Engineering technieken ter verbetering van de effectieve benutting van een MPLS netwerk. De ontwerpvraag van mijn onderzoek sluit hier goed bij aan. De ontwerpvraag maakt het namelijk mogelijk om het onderwerp zowel vanuit de theoretische kant (literatuuronderzoek) als vanuit de praktische kant (praktijktesten) te benaderen.

4.2 Onderzoekstrategie

Bij de probleemstelling heb ik beschreven welke deelvragen ik heb gesteld. Tevens heb ik uitgelegd waarom ik denk dat deze deelvragen beantwoord moeten worden om uiteindelijk de hoofdvraag te kunnen beantwoorden. Bij het opstellen van de onderzoekstrategie gaat het erom dat deze strategie ertoe leidt dat die informatie wordt gevonden die nodig is om de hoofd- en deelvragen te beantwoorden. Ik heb ervoor gekozen om die informatie te zoeken middels een literatuuronderzoek. Deelvraag 1 t/m 7 zijn mijns inziens vragen die met behulp van theoretische kennis beantwoord kunnen worden. Deelvraag 8 t/m 10 zijn meer gericht op praktische kennis. Deze praktische kennis kan gedeeltelijk uit praktijkvoorbeelden in de literatuur worden gehaald. Het overige deel is vooral een vertaling van theoretische kennis naar ontwerpeisen en een daadwerkelijk ontwerp. Theoretische kennis is daarmee het belangrijkst voor het beantwoorden van de deelvragen.

Andere opties voor het verkrijgen van de theoretische kennis hadden kunnen zijn het volgen van een cursus of het raadplegen van kennissen of collega's. Ik heb echter geen kennissen en/of collega's met kennis over dit onderwerp. Het volgen van een cursus heb ik nooit serieus overwogen omdat dit, als de cursussen er überhaupt zijn, veel meer geld kost dan een literatuuronderzoek.

Een belangrijk deel van dit onderzoek bestaat dus uit een literatuuronderzoek. Tijdens onderwijsblok T5 van mijn studie heb ik eveneens een literatuuronderzoek uitgevoerd. Ik heb destijds geleerd dat de zoekstrategie in ieder geval onderstaande drie vragen moet beantwoorden.

De vragen die de zoekstrategie moet beantwoorden en het nut van deze vragen:

1. welke literatuur zoek je? Bij deze stap leg je vast welke literatuur je al hebt en welke literatuur er nog ontbreekt. Hierdoor zoek je gericht naar de juiste literatuur.
2. waar ga je die literatuur zoeken? Bij deze stap leg je vast waar je gaat zoeken. Er zijn duizenden plaatsen om literatuur te zoeken. Door hier goed over na te denken en dit van tevoren vast te leggen zoek je veel gerichter naar literatuur en zoek je op de juiste plaats.
3. hoe ga je die literatuur zoeken? Bij deze stap leg je vast op welke manier je het zoeken aanpakt. Ga je bijvoorbeeld zoeken op 'keywords' of op inhoudsopgave. Dit zorgt ervoor dat je op een gestructureerde manier zoekt. Dit maakt ook een objectieve selectie van literatuur mogelijk. Als je dit niet vastlegt, kies je het ene boek misschien onbewust omdat het zo'n leuk voorwoord heeft en het andere omdat op basis van de inhoudsopgave blijkt dat een groot deel van het boek over jouw onderzoeksonderwerp gaat. Deze stap zorgt er dus voor dat je op de juiste manier naar literatuur zoekt.

Combinatie van de drie stappen leidt ertoe dat de juiste literatuur op de juiste plaats op de juiste manier wordt gezocht. Daarmee is dit een efficiënte manier van zoeken. Door de informatie vast te leggen in mijn onderzoeksplan zijn anderen in staat mijn werkwijze te controleren en bied ik hen de mogelijkheid om aanvullingen en/of commentaar te geven. In onderwijsblok T5 werd niet precies uitgelegd waarom deze vragen tot de juiste zoekstrategie leiden. In onderwijsblok T7 kwam ik in Verhoeven (2007, p. 56), wellicht niet geheel toevallig, dezelfde vragen tegen bij de beschrijving van de bekende informatie zoekmethode Big6™. De overige drie stappen van de Big6™ zijn het bestuderen van de resultaten, het organiseren van de resultaten en het evalueren van de resultaten. De eerste drie stappen bepalen dus de zoekstrategie, de laatste drie stappen gaan over de resultaten van het zoeken. Uit het feit dat een bekende methode als de Big6™ dezelfde zoekstrategie gebruikt en het feit dat de HHS dit bij het onderwijs over literatuuronderzoek onderschrijft, concludeer ik dat deze vragen goed gebruikt kunnen worden voor het bepalen van mijn zoekstrategie.

Hierna beschrijf ik de processtappen van de genoemde drie vragen. De eerste vraag is daarbij gesplitst in reeds beschikbare literatuur en ontbrekende literatuur.

Reeds beschikbare literatuur

In mijn onderzoeksplan beschrijf ik dit onderdeel in hoofdstuk 5.5.1. Voor aanvang van dit onderzoek had ik reeds de beschikking over een boek dat geheel gewijd is aan het toepassen van Traffic Engineering technieken in MPLS netwerken. Ik kwam dit boek min of meer toevallig tegen op zoek naar een interessant onderzoeksonderwerp. Ik wist dus ook niet of het een goed of een slecht boek was. Daarom heb ik eerst nagedacht over de criteria waaraan de literatuur die ik nodig heb voor dit onderzoek moet voldoen.

De opgestelde criteria aan de literatuur staan hieronder:

1. volledige informatie: ik zoek literatuur waarin alle MPLS Traffic Engineering technieken worden beschreven.
2. actueel: ik zoek literatuur uit die recent gepubliceerd is, de literatuur moet in ieder geval recenter zijn uitgegeven dan het boek dat ik reeds heb (dat is uit 2002).
3. betrouwbaar: ik zoek literatuur die afkomstig is van een betrouwbare bron.
4. onafhankelijk: ik zoek literatuur van een onafhankelijke bron/uitgever, de uitgever dient in ieder geval niet aan Cisco gerelateerd te zijn (het boek dat ik reeds heb is dat al, dat is van Cisco Press)

Hierna beschrijf ik waarom ik deze criteria belangrijk vind:

ad1. dat de informatie volledig is, is belangrijk voor het beantwoorden van mijn deelvragen. Met incomplete literatuur kan ik bijvoorbeeld deelvraag 3 'welke MPLS Traffic Engineering technieken zijn er?' niet beantwoorden. Ook kan onvolledige informatie voor een onjuist beeld van het onderzoeksgebied zorgen.

ad2. actuele literatuur is belangrijk omdat technieken binnen de netwerktechnologie snel achterhaald kunnen raken. Tevens worden sommige technieken in de loop der jaren uitgebreid. Hoe recenter de literatuur dus is hoe groter de kans dat de laatste uitbreidingen beschreven zijn en dat de techniek nog niet achterhaald is.

ad3. literatuur van een onbetrouwbare bron kan onjuistheden bevatten. Dat kan er toe leiden dat ik mijn vragen onjuist beantwoord of dat ik onjuiste conclusies trek. Dit wil ik uiteraard voorkomen door informatie van betrouwbare bronnen te gebruiken.

ad4. een onafhankelijke bron/uitgever geeft literatuur met objectieve informatie. Daarmee kan ik bijvoorbeeld zelf de conclusie trekken welke techniek het beste is. Een afhankelijke uitgever daarentegen is mogelijk geneigd om subjectieve (bijv. rooskleurigere) informatie te geven, wat er toe kan leiden dat ik mijn vragen onjuist beantwoord of dat ik onjuiste conclusies trek. Dit wil ik uiteraard voorkomen door informatie van onafhankelijke bronnen te gebruiken.

Ik heb het reeds beschikbare boek getoetst aan de beschreven criteria. Het boek bevat ruim 500 pagina en is geheel gewijd aan dit onderwerp, het lijkt dus compleet. Het boek is geschreven door twee netwerkexperts (Cisco Certified Internetwork Experts), de informatie zal waarschijnlijk dus wel betrouwbaar zijn. Het publicatiejaar 2002 en de uitgeverij Cisco Press zijn echter wel aandachtspunten. Het publicatiejaar vanwege de kans op verouderde informatie en de uitgever vanwege de mogelijk niet geheel objectieve behandeling van Cisco proprietary technieken. Tijdens een eerder studieblok werd er beweerd dat ik alleen Cisco proprietary technieken had vergeleken in mijn onderzoek. Daardoor zou de gemaakte vergelijking incompleet zijn. Hoewel ik de bewering kon weerleggen, let ik sindsdien extra op dit aandachtpunt. Op basis van toetsing aan deze criteria heb ik dit boek als uitgangspunt voor dit onderzoek heb gekozen. Dit heb ik in mijn onderzoeksplan ook beschreven zodat het voor de lezer duidelijk wordt waarom ik het boek geschikt acht voor dit onderzoek.

Welke literatuur zoek je?

Deze vraag heb ik beantwoord in hoofdstuk 5.5.2 Ontbrekende literatuur van het onderzoeksplan. Ik heb eerst beschreven welk doel ik met de gezochte literatuur wil bereiken, namelijk: *het verkrijgen van kennis over en ervaring met het inzetten van Traffic Engineering technieken voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk*. Het aangegeven doel is het hoofddoel van dit onderzoek, behorende bij de hoofdvraag van dit onderzoek. Zoals eerder aangegeven moet de literatuur die ik zoek mij uiteindelijk in staat stellen om alle deelvragen te beantwoorden. Mijn onderzoek richt zich op verschillende MPLS Traffic Engineering technieken. Ik zoek informatie waarin wordt uitgelegd wat de mogelijkheden van deze technieken zijn en waarin wordt beschreven hoe technieken werken. Als daarbij ook nog toepassingvoorbeelden, al dan niet met configuratie, worden gegeven is de informatie helemaal geschikt voor mijn onderzoek. Ik heb in het onderzoeksplan aangegeven welke soort literatuur ik nodig denk te hebben om de vragen te kunnen beantwoorden, te weten: *uitgebreide goed onderbouwde informatie. Het liefst ook nog voorzien van voldoende uitleg over de technieken en met praktijkvoorbeelden van het inzetten van de technieken*.

Ik heb ervoor gekozen om het zoeken in eerste instantie te richten op boeken en niet op artikelen. Ik denk dat ik meer kans heb om de gezochte informatie in een boek te vinden dan in een artikel. Daar is een aantal redenen voor, die ik hierna zal benoemen. Het boek dat ik reeds heb, bevat alleen al ruim 500 pagina's over dit onderwerp. Een artikel is over het algemeen maximaal 10 pagina's lang. Zelfs als de informatie in het boek onnodig uitgebreid is, heb ik voor dezelfde hoeveelheid aan nuttige informatie in artikelvorm minstens 10 tot 20 artikelen nodig. Deze artikelen moeten dan ook nog eens heel toevallig geen overlap hebben en goed op elkaar aansluiten. Mocht ik die artikelen al kunnen vinden, zal het zoeken naar al die artikelen waarschijnlijk veel meer tijd zal kosten dan het zoeken naar een boek. In het onderzoeksplan heb ik ook aangegeven waar ik de gezochte informatie wel en niet denk te vinden: *Dat is de reden dat de voorkeur voor dit onderzoek meer uitgaat naar boeken dan naar artikelen. Artikelen zijn over het algemeen maximaal ca. 10 pagina's lang. Het is onmogelijk om in 10 pagina's alle gezochte informatie te geven.*

Vervolgens ben ik nader ingegaan op de criteria waar de boeken aan moeten voldoen: *minimaal 2 andere boeken die geheel of gedeeltelijk over het inzetten van Traffic Engineering technieken in MPLS netwerken gaan. De boeken dienen bij voorkeur recenter te zijn dan het reeds beschikbare boek en van een onafhankelijke uitgever.* Door recentere en onafhankelijke boeken te zoeken, kan ik beoordelen of de aandachtpunten (genoemd bij de reeds beschikbare literatuur) terecht waren. Uiteindelijk heb ik ook nog beschreven hoe ik ga controleren of de gevonden informatie ook daadwerkelijk de informatie is die ik zocht: *Gecontroleerd zal worden of alle boeken dezelfde technieken benoemen en de werking en toepassing van de technieken overeenkomstig beschrijven. Indien dit het geval is, is het waarschijnlijk dat de informatie compleet is (behoudens recente ontwikkelingen, zie uitleg volgende paragraaf). En dat er binnen de netwerkwereld een eenduidige visie bestaat over de werking en toepassing van Traffic Engineering technieken.*

Hoewel de voorkeur uitgaat naar boeken heb ik toch één belangrijke reden aangegeven om ook naar artikelen te zoeken. *Die reden is dat nieuwe ontwikkelingen over het algemeen sneller in artikelen worden besproken dan in boeken. Informatie in een boek is over het algemeen minimaal een jaar oud, vanwege de tijd die het kost om een boek uit te geven. Informatie in artikelen is op het moment van publicatie meestal slechts één tot ca. 6 maanden oud. Er zal dus wel gezocht worden naar artikelen die recenter zijn dan het recentste gevonden boek.* Daarnaast heb ik ook rekening gehouden met de mogelijkheid: *dat er over een bepaalde techniek onvoldoende informatie in boekvorm te vinden is. In dat geval zal geprobeerd worden om één of meerdere artikelen te vinden om de informatie te verifiëren.*

Waar ga je die literatuur zoeken?

Ik heb geprobeerd om vanuit een zo breed mogelijke invalshoek te zoeken naar boeken. De TU-Delft en Picarta zijn zeer wetenschappelijk gerichte bronnen. Maar books.google.com en amazon.com liggen mogelijk wat minder voor de hand. De boeken database van google was bij mij tot voorkort onbekend, maar blijkt een grote collectie wetenschappelijke boeken te bevatten. Amazon is een erg bekende boeken website, maar niet speciaal gericht op wetenschappelijke boeken. Amazon is natuurlijk geen bibliotheek en het is niet mogelijk om boeken in te kijken. Het grote voordeel van Amazon heb ik benoemd, namelijk: *Vaak is de inhoudsopgave van boeken in te zien, wat een redelijk beeld geeft van de diepgang per onderwerp (bijvoorbeeld: gaan er slechts 2 pagina's over Traffic Engineering of zijn dat 50).* Dat tezamen met de enorme database aan boeken die bekend zijn, maakt dat je wel heel veel boeken kunt vinden en van die boeken een goede inschatting kunt maken van het nut voor je onderzoek. Voor artikelen heb ik mij gewend tot Picarta en de TU-Delft, beiden hebben een grote collectie wetenschappelijke artikelen en tijdschriften.

Hoe ga je die literatuur zoeken?

Het zoeken bestaat eigenlijk uit twee delen, het genereren van zoekresultaten en het selecteren van literatuur uit deze resultaten. Bij het eerste deel begin ik grof met vrij algemene zoektermen: *'MPLS' en/of 'Traffic Engineering' zijn de eerste zoektermen.* Daarna ga ik indien nodig verfijnen: *Afhankelijk van het aantal zoekresultaten zal verfijning plaats moeten vinden.* Als ik meer dan 30 zoekresultaten heb, zal ik eerst verder gaan verfijnen. De gedachte hierachter is dat ik van 30 boeken nog binnen een acceptabele tijd de inhoudsopgave kan bekijken. Ik heb een aantal voorbeelden gegeven waarmee ik de zoekresultaten kan verfijnen, zoals het toevoegen van een extra zoekterm, het zoeken op een recente publicatiedatum of het zoeken naar titelwoorden. Deze manier van zoeken vind ik erg prettig. Door grof te beginnen en dan langzaam in te zoomen krijg je een goed beeld van het onderzoeksgebied. Stel MPLS levert 100 resultaten op en 'MPLS + Traffic Engineering' levert maar 1 resultaat op, dan is het niet waarschijnlijk dat MPLS vaak wordt gecombineerd met Traffic Engineering of is Traffic Engineering niet een erg gangbare term. Al deze tussenresultaten helpen een beeld te krijgen van het onderzoeksgebied.

Zodra ik maximaal nog ca. 30 zoekresultaten heb, begin ik de selectieprocedure. Om de selectie te versnellen heb ik een quickscan van de titel als eerste stap gezet: *alleen als uit de titel blijkt dat het boek duidelijk niet geschikt is voor dit onderzoek valt het boek af, bij enige twijfel door naar*

stap 2. In hoofdstuk 5.1 wordt bij de beschrijving van het 'echte' selectieproces een aantal voorbeelden gegeven van titels die duidelijk niet geschikt zijn voor dit onderzoek. De volgende stap maak ik een inschatting van het nut van het boek voor dit onderzoek op basis van de inhoudsopgave: *op basis van aantal pagina's of gedeelte van het boek dat over Trafffic Engineering in MPLS netwerken gaat wordt de volgende keuze gemaakt. Veel pagina's betekent door naar stap 3, weinig pagina's betekent boek valt af, bij twijfel boek op reservelijst.* Veel pagina's is meer dan 100, twijfel is 50 tot 100, weinig is minder dan 50. Om tenslotte in te gaan op de beschikbaarheid van het boek: *voorkeur gaat uit naar boeken die beschikbaar zijn in de TU-Delft bibliotheek of via books.google.com. Niet al te dure boeken of zeer interessante boeken kunnen eventueel worden aangeschaft via www.amazon.com of een andere (online) boekwinkel.*

Als laatste ben ik nader ingegaan op de manier waarop ik de gevonden informatie wil gebruiken voor het beantwoorden van de deelvragen en de hoofdvraag. Een voorbeeld voor deelvraag 5 'Welke criteria bepalen de effectiviteit van de benutting van een (MPLS) netwerk?': *Het antwoord op vraag 5 dient mogelijk door de afstudeerder zelf afgeleid te worden uit de literatuur. Het lijkt op voorhand onwaarschijnlijk dat de literatuur een definitie van de effectiviteit van de benutting van een (MPLS) netwerk zal geven. Waarschijnlijk worden echter wel voorbeelden gegeven, waarbij het netwerk na het inzetten van een Traffic Engineering techniek effectiever worden benut. Uit deze voorbeelden kunnen dan effectiviteitcriteria worden afgeleid. Wanneer dit niet lukt, dient gezocht worden naar meer algemene informatie over het effectief benutten van een netwerk.*

4.3 Activiteiten

Hierna beschrijf ik eerst hoe ik voor dit onderzoek tot de lijst met uit te voeren activiteiten ben gekomen. Daarna geeft ik de activiteiten per projectfase en de activiteitenplanning.

uit te voeren activiteiten

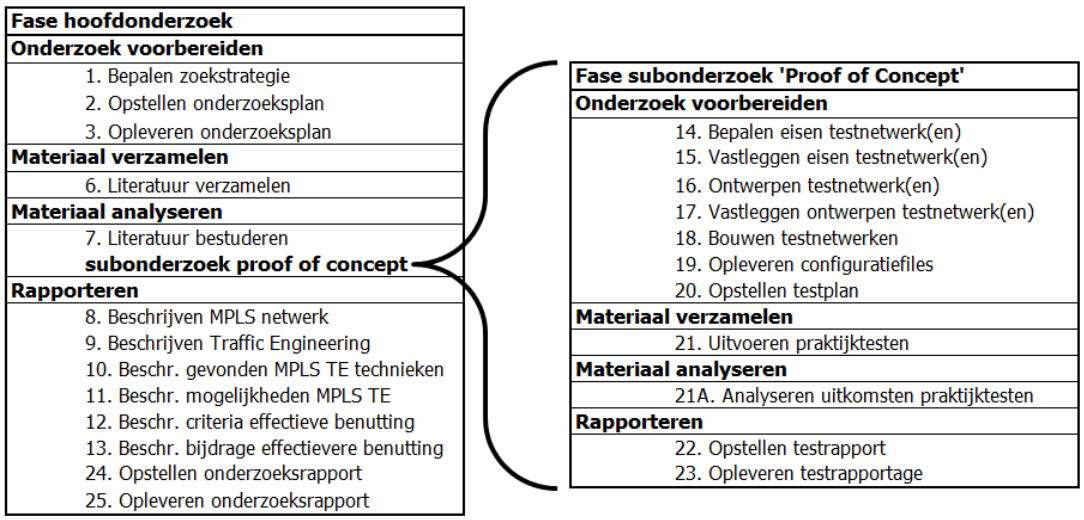
In hoofdstuk 5.2 van mijn onderzoeksplan (externe bijlage) heb ik een lijst met uit te voeren activiteiten opgenomen. Hierna beschrijf ik hoe ik deze lijst heb opgesteld.

De eerste vijf activiteiten vloeien direct uit voort uit de hiervoor genoemde methodieken. Activiteit 1 tot en met 3 behoren bij de voorbereidingsfase. De voorbereidingsfase draait geheel om het opstellen van een goed onderzoeksplan (activiteit 2). Ten tijde van het opstellen van deze lijst had ik reeds de probleemstelling opgesteld. Vandaar dat ik in de voorbereidingsfase alleen nog bepalen zoekstrategie (activiteit 1) als aparte activiteit noem, dit is naast de probleemstelling het belangrijkste ontbrekende deel van het onderzoeksplan. De activiteit opstellen onderzoeksplan is bedoeld voor het opstellen van de overige punten uit het onderzoeksplan, namelijk de activiteitenplanning en het faseringsschema. Met de probleemstelling, de (onder)zoekstrategie en de activiteitenplanning heb ik alle benodigde onderdelen van het onderzoeksplan conform Oost & Markenhof (2002, p.67). In Oost (2002, p.28) wordt aangegeven waarom het belangrijk is om een logboek bij te houden, de 4^{e} en 5^{e} activiteit horen hierbij. Dit onderzoek begint met een literatuurstudie, wat verklaart dat ik literatuur ga verzamelen en daarna bestuderen (activiteit nr. 7 en 8). Na bestudering van de literatuur ga ik de deelvragen beantwoorden. Het beschrijven van de antwoorden op deelvragen 1 t/m 7 behoren bij activiteit 8 t/m 13. Na het theorie gedeelte ga

ik de geleerde technieken in de praktijk testen. Daartoe bepaal ik eerst aan welke eisen de testnetwerken moeten voldoen, deze eisen leg ik vast (activiteit 14 en 15). Deze eisen vormen het antwoord op deelvraag 8. De eisen vertaal ik vervolgens in een of meerdere ontwerpen, deze neem ik op in het onderzoeksrapport (activiteit 16 en 17). De ontwerpen vormen het antwoord op deelvraag 9. Na het ontwerp ga ik het testnetwerk bouwen en lever ik de bijbehorende configuratiefiles op (activiteit 18 en 19). Als dat gelukt is, ga ik bedenken hoe ik het netwerk ga testen. Dit leg ik vast in een testplan (activiteit 20), waarna ik de testen ga uitvoeren (activiteit 21). Van de uitgevoerde testen stel ik een testrapportage op, die ik ook oplever (activiteit 22 en 23). De testrapportage geeft antwoord op deelvraag 10. Het totale onderzoek leg ik vast in een onderzoeksrapportage, deze lever ik uiteraard ook op (activiteit 24 en 25). De conclusie van mijn onderzoeksrapportage zal antwoord op de hoofdvraag geven. Ten slotte beschrijf ik mijn hele onderzoeksproces in een afstudeerverslag (activiteit 26 en 27).

faseringsschema

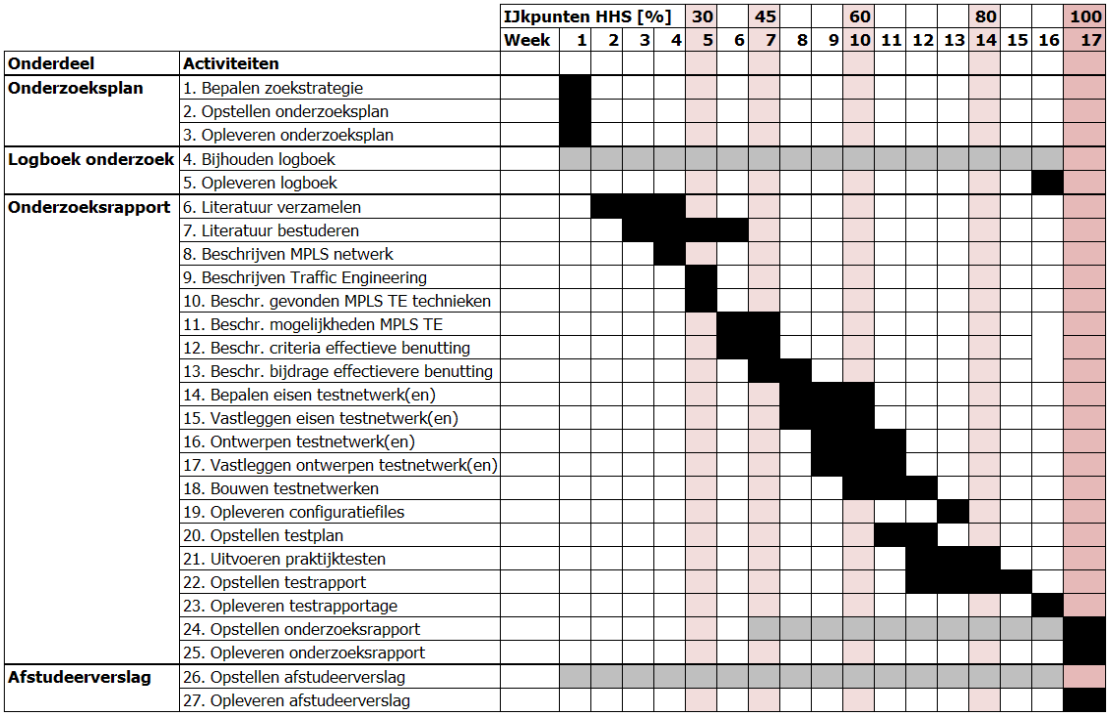
Conform de in hoofdstuk 3 genoemde methodieken heb ik het een onderzoek ingedeeld in vier fasen: 1. Voorbereiden onderzoek, 2. Materiaal verzamelen, 3. Materiaal analyseren en 4. Rapporteren. In figuur 3 zijn de activiteiten ingedeeld conform deze onderzoeksfasen. Ik heb dit schema opgenomen omdat de figuur voor iedereen duidelijk maakt welke activiteiten bij welke fase horen. Het praktijkonderzoek (Proof of Concept) heb ik als subonderzoek ingedeeld. De reden hiervoor is dat het een zo'n substantieel deel van het totale onderzoek in beslag neemt, dat het goed als los onderzoek met vier fasen beschouwd kan worden. Ten opzicht van het afstudeerplan is er één wijziging in de activiteiten. Activiteit '21. Uitvoeren praktijktesten' is opgesplitst in het uitvoeren en het analyseren van de uitkomsten. Dit is gedaan om duidelijk te maken dat de uitkomsten niet zo maar voor waar worden aangenomen. Ik zie de 'wijziging' overigens niet als afwijking van het afstudeerplan, maar als verduidelijking. Bij het opstellen van het testplan zal de verwachte uitkomst gegeven worden. Tijdens de uitvoering zal vervolgens gekeken worden of de uitkomsten aan de verwachting voldoen. Mocht dat niet zo zijn zal hiervoor een verklaring worden gezocht. Indien nodig zullen de eisen aan het testnetwerk of de testen zelf worden bijgesteld, waarna stap 14 t/m 23 opnieuw doorlopen zullen worden.



Figuur 3. Activiteiten ingedeeld naar onderzoeksfase.

activiteitenplanning

Alle beschreven activiteiten heb ik in een overzichtelijke planning (figuur 4 hieronder) gezet. Deze planning geeft in één oogopslag de 17 weken van het onderzoek weer. Van alle activiteiten wordt duidelijk wanneer zij uitgevoerd worden. Belangrijke ijkpunten, zoals de 30%, 60%, 80% en 100% zijn (licht)rood gemarkeerd. Om duidelijk te maken dat ik rekening heb gehouden met uitloop, heb ik bij de figuur aangegeven dat: *Bij de inschatting van de tijdsbesteding voor de activiteiten van figuur 4 is rekening gehouden met enige uitloop ten gevolge van tegenslagen. Omdat de uitloop al is verdisconteerd in de losse onderdelen is er aan het einde van het project geen extra uitloop opgenomen.*



Figuur 4. Schema tijdsplanning activiteiten

4.4 Opleveren onderzoeksplan

Het onderzoeksplan heb ik conform afspraak aan het einde van de eerste week opgeleverd aan de opdrachtgever. Het is belangrijk dat de opdrachtgever weet wat ik ga doen en hoe ik dat ga doen. En nog belangrijker dat de opdrachtgever ook akkoord is met deze aanpak. Na oplevering heb ik het plan met de opdrachtgever besproken, waarna nog enkele kleine wijzigingen en verduidelijking zijn aangebracht.

5. Projectfase: materiaal verzamelen

De enige activiteit in deze projectfase is 'Literatuur verzamelen'. Deze activiteit omvat het zoeken naar en het selecteren van de benodigde literatuur. Het zoeken en selecteren vindt plaats conform de in het onderzoeksplan beschreven zoekstrategie. In hoofdstuk 4.2 heb ik beschreven hoe ik tot deze zoekstrategie ben gekomen.

Tijdens deze projectfase is het tweede deel van de methodiek van Oost 'een onderzoek uitvoeren' gebruikt. Het boek gaat vrijwel volledig over de eisen aan antwoorden op (deel)vragen. Oost (p. 15) stelt dat het antwoord controleerbaar, vakkundig, logisch, valide, betrouwbaar en adequaat moet zijn. De rest van het boek gaat nader in op deze eisen en de fouten die ervoor kunnen zorgen dat het antwoord niet aan deze eisen voldoet. In deze onderzoeksfase beantwoord ik nog geen vragen. Daarom zijn niet alle gestelde eisen van toepassing op deze onderzoeksactiviteit. Hieronder heb ik eerst beknopt uitgelegd wat deze zes eisen inhouden. Daarna heb ik aangegeven wat ik er aan gedaan heb om aan deze eisen te voldoen. Als de eis niet van toepassing is heb ik dat ook aangegeven.

De eisen aan antwoorden op deelvragen:

- Controleerbaar: alle relevante stappen dienen beschreven en beargumenteerd te worden. De onderzoeker mag geen punten weglaten die tot een andere conclusie zouden kunnen leiden. De gegeven informatie dient dusdanig gedetailleerd te zijn dat het onderzoek herhaalbaar is.
- Vakkundig: een antwoord is vakkundig indien een effectieve, efficiënte en toelaatbare methode (strategie) is gebruikt om tot dat antwoord te komen. Toelaatbaar betekent in dit geval dat de methode ethisch verantwoord is, de methode mag bijvoorbeeld geen mentale of fysieke schade aanrichten bij de onderzochte personen.
- Logisch: een antwoord is logisch als er geen fouten in de redenatie zitten. Met redenatie worden de denkstappen van de onderzoeker bedoeld die voorafgaan aan het antwoord.
- Valide: een antwoord is valide als er geen fouten in het systeem zitten dat gebruikt wordt om het antwoord te vinden. Een voorbeeld van een fout in het systeem is een onterechte generalisatie van de steekproef naar een veel grotere groep.
- Betrouwbaar: een antwoord is betrouwbaar als het antwoord stabiel is. Dat wil zeggen dat een herhaling van het onderzoek tot hetzelfde antwoord moet leiden..
- Adequaat: een antwoord is adequaat als het antwoord aansluit bij de gestelde vraag. Met aansluiten wordt bedoeld dat het gevonden antwoord ook daadwerkelijk antwoord geeft op de gestelde vraag.

Hoe ik bij de literatuurselectie heb getracht zo goed mogelijk aan deze eisen te voldoen:

- Controleerbaar: in het document 'Selectie literatuur' (externe bijlage) heb ik alle zoekacties en selectiestappen beschreven. Ik heb ook aangegeven welke titels ik als niet interessant heb beoordeeld (stap 1 selectie), zodat anderen kunnen afwegen of zij dat terecht vinden of niet. Alle afwijkingen van de zoekstrategie uit het onderzoeksplan heb ik benoemd en beargumenteerd. De informatie is mijns inziens in ieder geval gedetailleerd genoeg om de zoekacties te kunnen herhalen.
- Vakkundig: deze eis heeft vooral te maken met de gebruikte methodiek. In hoofdstuk 4.2 heb ik reeds uitgebreid toegelicht waarom ik denk dat de gebruikte zoekstrategie effectief en efficiënt is. Ik vind mijn strategie ook toelaatbaar. Van het aanrichten van schade aan wie of wat dan ook lijkt me bij mijn zoekstrategie geen sprake.
- Logisch: deze eis heeft betrekking op de redenatie die voorafgaat aan een antwoord. Omdat in deze fase nog geen antwoorden beredeneerd worden, is deze eis niet relevant voor de literatuurselectie.
- Valide: deze eis heeft betrekking op de juiste vertaling van feiten (observaties, metingen enz.) in ideeën (theorieën, interpretaties, conclusies enz.). Van zulke vertalingen is in deze fase nog geen sprake. Daarom is deze eis niet relevant voor de literatuurselectie.
- Betrouwbaar: in Oost (2002, p.69) wordt aangegeven dat een systematische manier van zoeken de kans op toevalsfouten verkleind. Mijn zoekstrategie is systematisch, ik heb immers een nauwkeurig beschreven procedure opgesteld, die ik gebruikt heb om literatuur te selecteren. Door meerdere bronnen te gebruiken en de resultaten van deze bronnen te vergelijken, heb ik geprobeerd om toevalsfouten zoveel mogelijk uit te sluiten. Met vergelijken bedoel ik dat ik controleer of ik dezelfde literatuur vind bij de verschillende bronnen. Uiteraard hebben niet alle bronnen dezelfde literatuur. Maar het zou vreemd zijn als ik bijvoorbeeld bij de ene bron 20 boeken met informatie over MPLS Traffic Engineering vind en vervolgens geen van die boeken tegenkom bij een andere bron. Ook bij het verfijnen let ik er op dat niet opeens allerlei relevante titels verdwijnen. In hoofdstuk 5.1 geef ik voorbeelden van deze controles.
- Adequaat: er worden nog geen antwoorden gegeven in deze fase. Dus de eis dat het antwoord aan moet sluiten bij de gestelde vraag is niet relevant voor de literatuurselectie.

5.1 Selectieproces boeken

Ik geef eerst een algemene toelichting op het selectieproces, dit laat met name zien hoe ik de literatuur selectie gedocumenteerd heb in 'Selectie literatuur' (externe bijlage). Daarna beschrijf ik het selectieproces per bron: is de selectie conform de zoekstrategie gegaan, welke zoekacties zijn er geweest en wat hebben die opgeleverd, welke boeken zijn uiteindelijk interessant genoeg voor dit onderzoek. Het laatste punt dat ik beschrijf gaat in op de boeken die daadwerkelijk gebruikt zijn voor dit onderzoek.

algemene toelichting op selectieproces

Middels de opgestelde documentatie heb ik het onderzoek controleerbaar gemaakt. Ik geef alle benodigde zoekinstelling, zoektermen en eventuele verfijningen waarmee alle zoekacties herhaald kunnen worden. In tabel 1 geef ik aan welke zoekacties ik heb uitgevoerd en of ik na de zoekactie tot selectie ben overgegaan met een toelichting. In tabel 2 presenteer ik vervolgens de resultaten

(titels) van zoekactie 3 (ik heb hier slechts de eerste vier titels laten zien, dat lijkt me voldoende als voorbeeld). Per titel doorloop ik het selectieproces, is de titel interessant (ja/nee), zo ja dan heb ik de inhoudsopgave bekeken. Wanneer is het gepubliceerd en hoeveel pagina's gaan er over MPLS Traffic Engineering. Zijn dit er minder dan 50 is het niet interessant, bij 50-100 twijfel en bij meer dan 100 is het wel interessant. Daarbij nog ruimte voor een toelichting.
Van de titels die ik als niet interessant heb beoordeeld heb ik steekproefsgewijs toch enkele inhoudsopgaven bekeken. De reden hiervoor is dat ik nog niet heel bekend ben met dit vakgebied. Ik controleer hiermee of ik niet per ongeluk titels als niet interessant beoordeel. Uit de steekproef kwamen geen onjuiste beoordelingen, alle oninteressante titels hadden weinig tot geen pagina's over MPLS Traffic Engineering.

Voorbeeld documentatie overgenomen uit 'Selectie literatuur' (externe bijlage)
De zoekinstellingen die voor alle zoekacties gebruikt zijn:

- TU-Delft online catalogus: http://aleph.library.tudelft.nl
- datum zoekactie: 19 november 2009
- gezocht documenttype: alle
- standaard zoekinstelling: Field to search = basic index, Words adjacent = no

Tabel 1. Resultaten zoekacties TU-Delft

Nr.	**Zoektermen**	**Verfijning op:**	**Hits [-]**	**Heeft er selectie plaatsgevonden?**
1	MPLS	-	25	Nee, MPLS is als losse zoekterm iets te ruim, vooral bedoeld als oriënterend zoeken, eerst even kijken hoeveel hits er met Traffic Engineering overblijven, als dat er 0 zijn kan ik altijd nog uit deze 25 resultaten selecteren.
2	Traffic + Engineering	-	304	Nee, te veel hits
3	Traffic + Engineering + MPLS	-	9	Ja

Tabel 2. Selectieprocedure boeken van zoekactie 3 bij de TU-Delft

Titel	**Titel interessant?**	**Pub. jaar**	**Aant. pagina's MPLS-TE/totaal**	**Interessant aant. pag.?**	**Toelichting**
Delivering carrier Ethernet	Nee	-	-	-	
OSPF and IS-IS	Nee	-	-	-	
MPLS: next steps	**Ja**	2008	150/414	**Ja**	
Network quality of service: know it all	**Ja**	2008	35/330	Nee	

TU-Delft
Drie zoekacties uitgevoerd, bij de laatste overgegaan tot selectie. Van de negen boeken heb ik twee titels als niet interessant beoordeeld. In dit geval waren dat de titels 'Delivering carrier

Ethernet' en 'OSPF and IS-IS', ik zie niet in waarom deze boeken voor een groot deel over MPLS netwerken en Traffic Engineering zouden gaan. Van de overige zeven titels heb ik de inhoudsopgave bekeken en geschat hoeveel pagina's er over MPLS Traffic Engineering gaan. Op basis hiervan heb ik twee boeken als interessant en vijf als niet interessant bevonden. Op één punt heb ik een toelichtingen gegeven. Zoekactie 1 met zoekterm MPLS had 25 zoekresultaten, wat volgens de zoekstrategie normaal gesproken betekent 'overgaan tot selectie'. Dit was echter de eerste zoekactie, die vooral bedoeld was om even te kijken hoeveel MPLS boeken er zijn. Daarna heb ik gezocht op de zoektermen 'Traffic + Engineering' en 'MPLS + Traffic + Engineering'. Bij deze laatste zoekactie bleven er 9 zoekresultaten over, waarna ik ben overgegaan tot selectie. Deze 9 boeken zijn in ieder geval zowel aan de zoekterm MPLS als aan 'Traffic Engineering' gekoppeld. Hierdoor heb ik bij deze boeken een grotere kans op een voor dit onderzoek geschikt boek, dan bij de 25 zoekresultaten van de eerste zoekactie. Als er bij de laatste zoekactie geen resultaten waren geweest had ik altijd nog tussen de 25 resultaten van de eerste zoekactie kunnen zoeken.

Amazon

Bij Amazon heb ik 9 zoekacties uitgevoerd, uit 2 van de zoekacties volgde een selectie. Hieruit kwamen 17 interessante titels, waarvan ik de inhoudsopgave heb bekeken. Vier boeken bleken interessant, 5 twijfelachtig en 8 boeken werden niet interessant bevonden.

In eerste instantie heb ik de zoektermen MPLS + Traffic + Engineering gebruikt. Deze resultaten heb ik verfijnd op jaartal en categorie. Er bleven uiteindelijk echter in alle gevallen minimaal 90 resultaten over, wat te veel was om tot selectie over te gaan. Daarom heb ik, conform de zoekstrategie, het toevoegen van een extra zoekterm geprobeerd. Ik heb met 'tunnel' en 'reroute' als extra zoekterm gezocht, wat respectievelijk 17 en 6 resultaten opleverde. In het document 'Selectie Literatuur' (externe bijlage) leg ik uit waarom ik daarna niet tot selectie ben overgegaan. *De zoekresultaten lijken erg onrelevant. Dit wordt geconcludeerd uit de titels en uit het afwezig zijn van wel relevante titels. Bij vorige zoekacties verschenen in het eerste resultatenscherm (12 zoekresultaten) allemaal boeken die op basis van de titel interessant zijn. Een voorbeeld is het boek dat reeds in het bezit van de afstudeerder is. De afwezigheid van deze titel duidt erop dat de aanwezigheid van zoektermen in de inhoudsopgave niet voldoende is. Het lijkt erop dat de zoektermen echt als keywords aan het boek toegevoegd moeten zijn, wil het boek bij de resultaten verschijnen.*

Vervolgens heb ik de zoekstrategie enigszins bij moeten stellen, dat heb ik als volgt onderbouwd: *zoeken op MPLS en Traffic Engineering levert te veel hits op (minimaal 90), toevoeging van een extra zoekterm als 'tunnel' of 'reroute' levert te weinig relevante hits op. De opgestelde zoekstrategie loopt hier dus enigszins vast. Extra verfijning is lastig, verfijnen op categorie lukt niet, verfijnen op jaartal is niet logisch. Voor literatuur uit de laatste 5 jaar (vanaf 2005) valt wel wat te zeggen (conform toelichting zoekstrategie onderzoeksplan), maar verfijning door te zoeken in literatuur vanaf bijv. 2008 is moeilijk verdedigbaar. Conform het onderzoeksplan wordt een goed boek gezocht waarin diep op het toepassen van Trafffic Engineering technieken wordt ingegaan. Bij voorkeur dient dit boek recenter dan 2002 (reeds beschikbare boek) te zijn. Dit lijkt*

redelijk aangezien in ca. 7 jaar tijd de kans redelijk groot is dat er een goed boek over dit onderwerp uitkomt. Ook in 5 jaar (zoeken vanaf 2005) is dit argument redelijk. De kans dat in een periode van 2 jaar een goed boek uitkomt is echter al weer veel kleiner en dus moeilijker verdedigbaar. Omdat uit het eerste scherm met resultaten van zoekpoging 5 blijkt dat er bij zoeken op MPLS en Traffic Engineering veel interessante titels bij zitten, wordt besloten nog eens nader naar de zoekstrategie te kijken. Hieruit blijkt dat met name stap 2 (bekijken inhoudsopgave) en stap 3 (bekijken beschikbaarheid) redelijk veel tijd kosten. Stap 1 (screenen Titel) is wel snel te doen. Het argument dat bij de zoekstrategie genoemd werd om bij maximaal 30 zoekresultaten over te gaan tot selectie, was ook dat het bekijken van maximaal 30 inhoudsopgaven nog wel binnen redelijke tijd te doen is. Besloten wordt om de 90 zoekresultaten van zoekpoging 5 te screenen op titel. Wanneer er na stap 1 maximaal ca. 30 titels overblijven, zal hiervan de inhoudopgave bekeken worden.

Als laatste heb ik nog een extra zoekactie uitgevoerd, met de volgende toelichting: *Bij de selectie van zoekactie 8 werden 8 interessante titels gevonden. Opvallend is dat bij resultaat 24 tot 90 geen enkele interessante titels zit. Dit wijst erop dat de 'relevantie' (boeken worden standaard gesorteerd op relevantie) van Amazon op z'n minst redelijk werkt. Omdat bij deze zoekactie de verfijning 'vanaf 2005' als publicatiejaar nog aanstond en er slechts 8 resultaten overblijven, is besloten om ook nog wat ruimer te zoeken. Bijkomende reden om ruimer te zoeken is dat de interessante titels die bij de TU Delft gevonden werden niet tussen de zoekresultaten stonden. Eerder bij zoekactie 3 kwamen deze titels nog op het eerste resultatenscherm. Daarom zal zoekactie 3 herhaald worden, waarbij de eerste 100 titels zullen worden gescreend. Dit laatste lijkt op basis van de eerder bevindingen ten aanzien van de relevantie met deze zoektermen gerechtvaardigd.* In voorgaande toelichting geef ik ook aan dat ik de resultaten controleer om de betrouwbaarheid van het onderzoek te verhogen (grijze markering hierboven).

De zoekacties waarbij tot selectie is overgegaan hadden respectievelijk 90 en 267 titels als zoekresultaat. Ik heb besloten deze niet allemaal op te nemen in de resultaten, maar wel een aantal voorbeelden te geven van niet geselecteerd boeken: *De titels die niet interessant bevonden werden bij zoekactie 8 en 9 zijn niet opgenomen in tabel 4, daarvoor zijn het er te veel. Het waren vooral heel veel boeken over internationale congressen op computertechnologiegebied. Daarnaast waren er een groot aantal boeken waarvan niet verwacht wordt dat een groot deel van de inhoud op MPLS Traffic Engineering gericht zal zijn. Enkele voorbeelden van niet geselecteerde titels: Junos for Dummies, Cisco Express Forwarding, Cisco Telepressence Fundamentals, Advanced Wireless Networks: Cognitive, Cooperative & Opportunistic 4G Technology.*

Google

Bij Google heb ik 7 zoekacties uitgevoerd, uit 2 van de zoekacties volgde een selectie. Hieruit kwamen 4 interessante titels, waarvan ik de inhoudsopgave heb bekeken. Eén boek bleek interessant, 1 twijfelachtig en 2 boeken werden niet interessant bevonden.

De eerste drie zoekacties waren met de zoektermen MPLS + Traffic + Engineering. Toevoeging van een verfijningen op jaartal en weergave leverde nog steeds veel te veel zoekresultaten op.

Weergave slaat er bij books.google.com op het boek beperkt of volledig te bekijken is). Daarna heb ik conform de zoekstrategie de zoektermen 'tunnel' en 'fast reroute' toegevoegd. Deze zoektermen zijn namen van MPLS Traffic Engineering technieken die ik in de inhoudsopgave van het reeds beschikbare boek heb gevonden. Met de toevoeging van beide zoektermen kwam ik uit op 53 zoekresultaten, wat op basis van de zoekstrategie te veel is om over te gaan tot selectie. Op basis van dezelfde reden als zojuist beschreven bij Amazon ben ik ook nu over gegaan tot selectie.

Nadat ik al bezig was met het bestuderen van de literatuur kwam ik er achter dat de techniek 'fast reroute' ook vaak 'link protection' wordt genoemd. Om te voorkomen dat ik hiermee interessante boeken over het hoofd had gezien, heb ik de laatste zoekactie nogmaals uitgevoerd, maar nu met de zoekterm 'link protection' in plaats van 'fast reroute'. Ook dit is weer een voorbeeld van het verhogen van de betrouwbaarheid. Door de zoekactie met een vergelijkbare zoekterm te herhalen, vergroot ik de kans dat ik bepaalde boeken 'toevallig' wel of juist niet vind.

Opnieuw heb ik de oninteressante titels niet opgenomen bij de zoekresultaten, wel heb ik weer een aantal voorbeelden gegeven van oninteressante titels: *De titels die niet interessant bevonden werden bij zoekactie 6 zijn niet opgenomen in tabel 6, daarvoor zijn het er te veel. Het waren vooral heel veel boeken over internationale congressen op computertechnologiegebied. De titels waarvan bij www.amazon.com de inhoudsopgave reeds is bekeken, zijn niet nogmaals beoordeeld. Daarnaast waren er een groot aantal boeken waarvan niet verwacht wordt dat een groot deel van de inhoud op MPLS Traffic Engineering gericht zal zijn. Enkele voorbeelden van niet geselecteerde titels: Broadband Internet deployment in Japan, Optical networks and technologies, JUNOS cookbook, Achieving the triple play: technologies and business models for success.*

Picarta

Bij Picarta heeft slechts één interessante zoekactie plaatsgevonden. Deze zoekactie was met de vrij algemene zoekterm 'MPLS'. Hieruit volgden 13 titels, waarvan er 7 reeds beoordeeld waren bij Amazon of Google. Van de zes overgebleven titels werden er 5 als interessant betiteld. Het bekijken van de inhoudsopgave van deze boeken is bij Picarta niet mogelijk. Van drie titels heb ik de inhoudsopgave bij Amazon kunnen bekijken. Al deze drie boeken bleken uiteindelijk oninteressant op basis van de inhoudsopgave. Van de twee andere boeken heb ik bij books.google.com gezocht op het aantal maal dat 'traffic engineering' voorkwam in het boek. In beide boeken kwam de term slechts drie maal voor, waardoor ik de boeken als oninteressant heb ingeschat.

Voorgaande zoekactie maar dan met zoektermen 'MPLS + Traffic + Engineering' leverde 0 hits op. Dezelfde zoekactie maar dan met zoektermen 'Traffic + Engineering' leverde vele hits op, maar deze titels gingen allemaal over wegverkeer. Het plannen van wegverkeersstromen heet namelijk ook 'Traffic Engineering'.

Beschikbaarheid boeken

De laatste selectiestap is het bekijken van de beschikbaarheid van de boeken. Aan een goed boek heb ik immers niets als het niet in mijn bezit kan krijgen of via books.google.com kan bekijken. Ik

heb deze laatste selectiestap als volgt beschreven in het document 'Selectie literatuur': *Nu alle beoogde bronnen geraadpleegd zijn rest nog de laatste stap van het selectieproces, namelijk het daadwerkelijk selecteren van de boeken. Er zijn in totaal 7 boeken die als interessant genoeg betiteld zijn op basis van de inhoudsopgave. Een zeer opvallend resultaat was het boek 'Traffic Engineering in MPLS Networks'. Dit boek lijkt op basis van de titel volledig over MPLS Traffic Engineering te gaan. Op Amazon wordt het als 'op dit moment niet beschikbaar' aangegeven, maar het boek lijkt nooit te zijn uitgegeven. Er zijn geen gebruikte exemplaren te koop op Amazon en ook geen recensies over het boek. Zoeken op de website van de uitgever en de auteur levert evenmin iets op. Ook googlen levert geen aanvullende informatie op, behalve één website waar staat dat het boek nooit gepubliceerd is. Dat laatste lijkt dan ook de enige verklaring. In de zoekstrategie is aangegeven dat de voorkeur uitgaat naar boeken die bij de bibliotheek van de TU-Delft beschikbaar zijn, of die volledig op books.google.com staan. Van de 7 interessante boeken zijn er 2 via de TU-Delft beschikbaar. Deze boeken voldoen aan de selectiecriteria dat ze van een onafhankelijke uitgever zijn en dat ze recenter zijn uitgegeven dan het reeds beschikbare boek. Geen van de 7 boeken is volledig op books.google.com beschikbaar. Daarom is besloten om de 2 boeken van de TU-Delft te selecteren en verder te gebruiken voor dit onderzoek. Enige reden om hiervan af te wijken, had een groot verschil in het aantal interessante pagina's kunnen zijn. De 2 boeken van de TU-Delft bevatten respectievelijk ca. 130 en 150 over MPLS Traffic Engineering. De andere boeken bevatten 100 tot 200 pagina's over MPLS Traffic Engineering. Dat verschil is niet groot genoeg om af te wijken van de zoekstrategie. Mochten de 2 TU-Delft boeken in de praktijk tegenvallen, kan altijd nog besloten worden één van de andere boeken te gebruiken.*

Op basis van het voorgaande is besloten om het reeds beschikbare boek (nummer 1 hieronder) te gebruiken als basis voor dit onderzoek. Dit boek van ruim 500 pagina's gaat geheel over MPLS Traffic Engineering. De theorie in dit boek zal vergeleken worden met de andere 2 boeken. Gecontroleerd zal worden of alle boeken dezelfde technieken benoemen en de werking en toepassing van de technieken overeenkomstig beschrijven. Indien dit het geval is, is het waarschijnlijk dat de informatie compleet is (behoudens recente ontwikkelingen, zie uitleg bij artikelen). En dat er binnen de netwerkwereld een eenduidige visie bestaat over de werking en toepassing van Traffic Engineering technieken. Wanneer de theorie overeenkomt, zal het niet nodig zijn om nog andere boeken te gebruiken.

De lijst met te gebruiken boeken:

1) *Osborne, E., Simha, A., Traffic Engineering with MPLS, (2002, eerste druk), Indianapolis USA: Cisco Press;*
2) *Davie, B., Farrel, A., MPLS: Next Steps, (2008, eerste druk), Burlington USA: Morgan Kaufmann Publishers (Elsevier);*
3) *Minei, I., Lucek, J., MPLS-Enabled Applications, (2005, eerste druk), Chichester England: John Wiley & Sons Ltd;*

Met deze laatste stap is het selecteren van boeken afgerond voor dit onderzoek.

5.2 Selectieproces artikelen

Het selectieproces van artikelen heb ik op een vergelijkbare manier gedocumenteerd als het selectieproces van boeken, eveneens in 'Selectie literatuur' (externe bijlage). Onder het kopje 'algemene toelichting op het selectieproces', beschrijf ik de verschillen met het selectieproces van boeken. Daarna beschrijf ik het selectieproces per bron: is de selectie conform de zoekstrategie gegaan, welke zoekacties zijn er geweest en wat hebben die opgeleverd, welke artikelen zijn uiteindelijk interessant genoeg voor dit onderzoek.

algemene toelichting op selectieproces

Voornaamste verschil tussen het selecteren van boeken en artikelen, zit in de selectiestappen om te beoordelen of de literatuur interessant is voor dit onderzoek. Bij boeken heb ik de inschatting gemaakt op basis van de titel en de inhoudsopgave. Artikelen hebben echter geen inhoudsopgave. Sommige artikelen hebben wel een preview of samenvatting. Indien de titel interessant was, heb ik deze preview (voor zover mogelijk) gebruikt om in te schatten of het artikel interessant was.

Conform de zoekstrategie zijn alleen artikelen gezocht die recenter gepubliceerd zijn dan het meest recente boek dat voor dit onderzoek gebruikt wordt. Boek nummer 2 (zie hoofdstuk 5.1 kopje beschikbaarheid boeken) is uit 2008, de andere twee boeken die voor dit onderzoek gebruikt worden zijn ouder. De informatie in dit boek is bij publicatie mogelijk al een jaar oud (dus ongeveer uit 2007), vanwege de tijd die het kost om een boek te publiceren. Daarom zijn artikelen gezocht met een publicatiedatum vanaf januari 2007.

TU-Delft

Bij het zoeken naar boeken heb ik reeds gezocht op alle documenttypen. Tussen de resultaten stonden geen artikelen. Daarom heb ik niet opnieuw naar artikelen gezocht.

Amazon en Google

Op www.amazon.com en books.google.com heb ik gezocht op de zoekterm 'MPLS + Traffic + Engineering' en documenttype 'tijdschriften' vanaf januari 2007. Er werden geen zoekresultaten gevonden.

Picarta

Bij Picarta heb ik 3 zoekacties uitgevoerd, uit 1 van de zoekacties volgde een selectie. Alle zoekacties waren op documenttypen: online bronnen, tijdschriften (online), tijdschriften (gedrukt), artikelen. Ik heb niet gezocht naar de documenttypen: boeken, brieven, illustratief, geluid, software, bladmuziek, audiovisueel, cartografie. Hiermee maak ik mijn keuzes controleerbaar, ik laat zien waar ik wel naar zoek en ook waar ik niet naar zoek.

De eerste zoekactie was op zoekterm 'MPLS' en leverde te veel hits op (105). De tweede zoekactie was op zoekterm 'Traffic Engineering' en leverde eveneens te veel hits op (410). De derde zoekactie was op zoektermen 'MPLS + Traffic + Engineering'. Hierbij waren er 11 zoekresultaten en is tot selectie overgegaan. Van 5 artikelen was het mogelijk om de preview te bekijken, dit heb ik ook gedaan. Ik heb geen van de artikelen interessant genoeg bevonden voor dit onderzoek, ik

heb dat in het document 'Selectie literatuur' (externe bijlage) als volgt onderbouwd: *Uiteindelijk geen van de 11 artikelen interessant genoeg bevonden. Van alle artikelen waarvan dat mogelijk was (de eerste 5) is de preview bekeken. Voor al deze artikelen geldt dat ze over nieuwe methoden of technieken gaan om het netwerkverkeer te optimaliseren. Dit zijn echter geen methoden die nu geconfigureerd kunnen worden. Het zijn meer voorstellen of ideeën waaruit in de toekomst een nieuwe standaard voort kan komen. De artikelen vallen daarmee buiten het doel van dit onderzoek, dat alleen ingaat op technieken die op dit moment in de praktijk getest kunnen worden. De artikelen waren hoogstens leuk geweest voor een kleine blik op de toekomst, maar voor alle artikelen dient betaald te worden. Ook voor de artikelen zonder preview dient betaald te worden. De titels zonder preview liggen in de lijn van de titels met preview. De verwachting is dan ook niet dat ze een grote bijdrage aan het doel van dit onderzoek kunnen opleveren. De kosten en de waarschijnlijk geringe bijdrage hebben de afstudeerder doen besluiten om geen artikelen te selecteren.*

Conclusie artikelen

Alleen bij Picarta heb ik artikelen recenter dan januari 2007 gevonden, deze heb ik echter niet interessant bevonden. Daarom heb ik besloten om geen artikelen voor dit onderzoek te gebruiken.

6. Projectfase: materiaal analyseren

Deze projectfase bestaat uit de activiteiten 'literatuur bestuderen' en het gehele subonderzoek 'Proof of Concept'. Hoewel het Proof of Concept tot deze fase behoort, wordt het apart beschreven in hoofdstuk 8. In hoofdstuk 7 wordt eerst de rapportage van deelvragen 1 t/m 7 (de deelvragen van het theoretisch deel van dit onderzoek) behandeld. In werkelijkheid heb ik ook eerst deze deelvragen gerapporteerd voor aanvang van het Proof of Concept. Met deze hoofdstuk indeling hou ik dit procesverslag dus chronologisch, wat de leesbaarheid ten goede komt. In dit hoofdstuk ga ik dus alleen in op de activiteit 'literatuur bestuderen'. Zoals bij de meeste literatuurstudies heeft het bestuderen van de onderzoeksliteratuur als doel om theoretische kennis op te doen. En wel kennis waarmee ik de deelvragen en uiteindelijk de hoofdvraag kan beantwoorden. In het onderzoeksplan heb ik aangegeven dat ik verwacht deelvraag 1 t/m 4 en deelvraag 6 en 7 te kunnen beantwoorden na het bestuderen van de literatuur. In hoofdstuk 6.1 beschrijf ik per deelvraag hoe ik het bestuderen van de literatuur heb aangepakt. In hoofdstuk 7 ga ik in op de rapportage van deze deelvragen. Deelvraag 5 heb ik, conform het onderzoeksplan, afgeleid uit de kennis die ik opgedaan heb bij de literatuurstudie voor deelvraag 1 t/m 4. Omdat voor deze vraag geen aparte literatuur geanalyseerd is, komt deze deelvraag alleen in hoofdstuk 7 aan bod. Deelvraag 8 t/m 10 hebben betrekking op het subonderzoek Proof of Concept, deze deelvragen worden in hoofdstuk 8.8 behandeld. Het antwoord op de hoofdvraag is afgeleid uit de antwoorden van de deelvragen, de hoofdvraag wordt in hoofdstuk 9 behandeld.

Tijdens deze projectfase is net als bij de vorige fase het tweede deel van de methodiek van Oost 'een onderzoek uitvoeren' gebruikt. Net als bij de vorige projectfase ga ik in op de door Oost gestelde eisen aan antwoorden op (deel)vragen. Hieronder geef ik aan wat ik in deze fase heb gedaan om ervoor te zorgen dat mijn antwoorden controleerbaar, vakkundig, logisch, valide, betrouwbaar en adequaat zijn. Omdat ik in deze onderzoeksfase nog geen vragen beantwoord, zijn niet alle gestelde eisen van toepassing. Als een eis tijdens deze fase niet van toepassing is, geef ik dat hieronder aan.

Hoe ik bij de analyse van de literatuur heb getracht zo goed mogelijk aan deze eisen te voldoen:

- Controleerbaar: het is lastig om de analyse zelf controleerbaar te maken. Indirect doe ik dat wel bij de rapportage van de deelvragen. Daar geef ik aan uit welke literatuur de theoretische kennis komt. In hoofdstuk 7 geef ik hier voorbeelden van.
- Vakkundig: deze eis heeft vooral te maken met de effectiviteit en efficiëntie van de gebruikte methodiek voor het bestuderen van de literatuur. Ik denk dat ik inderdaad een effectieve en efficiënte methode heb gebruikt voor het analyseren van de literatuur. Ik heb drie boeken gebruikt om alle theoretische kennis uit op te doen. Belangrijkste argument voor het gebruik van drie boeken is dat ik een compleet beeld van de mogelijkheden van MPLS Traffic Engineering technieken wil krijgen. De eerste stap in de literatuur analyse was een quickscan van de drie boeken op de MPLS Traffic Engineering technieken die beschreven worden. Ik heb bij de quickscan puur gekeken 'welke' technieken beschreven werden, niet zozeer naar de beschrijving zelf. De boeken bleken alle drie dezelfde technieken te beschrijven. Daarmee wist ik in ieder geval dat de informatie compleet was. Vervolgens heb ik per deelvraag de

bijbehorende theorie bestudeerd. Daarvoor heb ik telkens eerst de theorie in Osborne & Simha (2002) bestudeerd. Dit boek bevat de meest uitgebreide en onderbouwde theorie, wat ik persoonlijk erg belangrijk vind voor het begrijpen van de mogelijkheden van MPLS Traffic Engineering technieken. Deze theorie heb ik vergeleken met de theorie in de andere twee boeken. Indien de theorie overeenkwam, kon ik verder met het bestuderen van de theorie van volgende deelvraag.

- Logisch: deze eis heeft betrekking op de redenatie die voorafgaat aan een antwoord. Omdat in deze fase nog geen antwoorden beredeneerd worden, is deze eis niet relevant voor het analyseren van de literatuur.
- Valide: deze eis heeft betrekking op de juiste vertaling van feiten (observaties, metingen enz.) in ideeën (theorieën, interpretaties, conclusies enz.). Van zulke vertalingen is in deze fase nog geen sprake. Daarom is deze eis niet relevant voor het analyseren van de literatuur.
- Betrouwbaar: zoals bij 'vakkundig' beschreven, heb ik gebruik gemaakt van drie verschillende boeken bij mijn literatuur analyse. Ik heb de theorie in al deze boeken vergeleken. Hiermee verklein ik de kans op toevalsfouten. Als ik slechts één boek zou gebruiken, bestaat de kans dat ik toevallig een boek heb geselecteerd dat afwijkt van andere boeken op dit gebied. Dit kan bijvoorbeeld omdat de auteur bepaalde technieken niet belangrijk vindt en deze weglaat in zijn boek. Of omdat de auteur een andere visie heeft op het gebruik van de technieken.
- Adequaat: Er worden nog geen antwoorden gegeven in deze fase. Dus de eis dat het antwoord aan moet sluiten bij de gestelde vraag is niet relevant voor de literatuur analyse.

Literatuur analyse

Per deelvraag heb ik hieronder aangegeven hoe ik het bestuderen van de literatuur aangepakt heb en of de analyse conform plan is verlopen. Het plan is de zoekstrategie in het onderzoeksplan aangevuld met de methode die ik in de introductie van dit hoofdstuk bij 'vakkundig' heb beschreven. Conform Oost ga ik in deze fase alleen in op de analyse van de literatuur benodigd voor het beantwoorden van de deelvragen. De daadwerkelijke antwoorden op de deelvragen zijn terug te vinden bij de fase rapportage in hoofdstuk 7.

Deelvraag 1. Wat is een MPLS netwerk?

Voor het beantwoorden van deze vraag heb ik Osborne & Simha (2002, hoofdstuk 2) bestudeerd, zoals ik ook had aangegeven in het onderzoeksplan (hoofdstuk 5.4.4). Ik heb de gevonden theorie over de werking van MPLS netwerken geverifieerd met de kennis over dit onderwerp die ik tijdens onderwijsblok T5 (CCNP deel 2) heb opgedaan. Ik heb er voor gekozen om de theorie uit dit hoofdstuk te gebruiken omdat de auteurs aangeven (p. 21) dat zij in dit hoofdstuk 'the fundamental concepts of MPLS-based forwarding' uitleggen. Dat is precies de theorie die ik zoek. Ik heb in het onderzoeksplan namelijk aangegeven dat ik met het beantwoorden van deze vraag een beeld van de globale werking van een MPLS netwerk wil geven.

Deelvraag 2. Wat is Traffic Engineering?

In alle drie de boeken heb ik een beschrijving van het begrip Traffic Engineering gevonden. Met behulp van de inhoudsopgave had ik de informatie snel gevonden. In Minei & Lucek (2005) vond ik de informatie in de introductie van het hoofdstuk 'Traffic Engineering with MPLS'. In de andere

twee boeken was er eenvoudigweg een (sub)hoofdstuk genaamd 'What is Traffic Engineering'. De drie gevonden beschrijvingen waren vergelijkbaar, waaruit blijkt dat er binnen dit onderzoeksgebied een eenduidig beeld heerst ten aanzien van het begrip Traffic Engineering. Met het bestuderen van deze theorie heb ik voldoende kennis over het begrip Traffic Engineering opgedaan om deze deelvraag te kunnen beantwoorden.

Deelvraag 3. Welke MPLS Traffic Engineering technieken zijn er?
Zoals beschreven in de introductie van dit hoofdstuk heb ik eerst een quickscan op de drie boeken uitgevoerd om te kijken welke MPLS Traffic Engineering technieken de boeken beschrijven. Uit de quickscan bleek dat de boeken allemaal dezelfde MPLS Traffic Engineering technieken beschrijven. Daarmee heb ik voldoende informatie gevonden voor het beantwoorden van deze deelvraag.

Deelvraag 4. Welke mogelijkheden bieden de MPLS Traffic Engineering technieken?
Bij de bestudering van de theorie voor het beantwoorden van deelvraag 3 werd mij duidelijk dat alle MPLS Traffic Engineering technieken gebaseerd zijn op het gebruik van MPLS Traffic Engineering tunnels. Voordat ik theorie over de mogelijkheden heb bestudeerd, heb ik daarom eerst hoofdstuk 3 en 4 van Osborne & Simha (2002) bestudeerd. Daarin wordt precies uitgelegd hoe een MPLS Traffic Engineering tunnel geconfigureerd kan worden en welke opties er daarbij allemaal zijn. Hiermee heb ik een goed beeld van MPLS Traffic Engineering tunnels verkregen. Ik heb voor dit boek gekozen omdat dit boek de meest uitgebreide informatie over tunnelconfiguratie geeft en omdat het boek daarbij de Cisco commando's geeft. Deze commando's kan ik later weer gebruiken bij de praktijktesten, waar ik ook gebruik maak van Cisco routers.

Zonder het creëren van tunnels kunnen de MPLS Traffic Engineering technieken dus niet worden toegepast. De toepassingsdoeleinden van de technieken zijn op te delen in drie categorieën, toepassing voor:

- Load sharing;
- Quality of Service (QoS);
- Recovery en Protection;

Ik heb de theorie per toepassingsgebied bestudeerd. Daarbij heb ik de methodiek gebruikt, die ik in de introductie van dit hoofdstuk heb beschreven (bij 'Vakkundig'). Ik heb dus telkens eerst de theorie in Osborne & Simha (2002) bestudeerd, deze theorie heb ik vergeleken met de theorie in de twee andere boeken.

In Osborne & Simha (2002, hoofdstuk 5) heb ik een aantal situaties gevonden waarin MPLS Traffic Engineering technieken ten behoeve van load sharing gebruikt kunnen worden. Vergelijkbare situaties heb ik gevonden in Davie & Farrel (2008, hoofdstuk 5.1 t/m 5.5) en Minei & Lucek (2005, hoofdstuk 2), al hanteren deze boeken niet de term load sharing.

De toepassing van MPLS Traffic Engineering ten behoeven van QoS wordt behandeld in Osborne & Simha (2002, hoofdstuk 6), Davie & Farrel (2008, hoofdstuk 6) en Minei & Lucek (2005, hoofdstuk 4). Ik heb al deze hoofdstukken bestudeerd. Daarbij heb ik het volgende verschil tussen

Osborne & Simha en de andere twee boeken gevonden: *In Osborne & Simha (2002, H6) worden de termen MAM en RDM niet gebruikt. Er wordt een model beschreven dat hetzelfde werkt als RDM met maximaal 2 prioriteitsklassen. Op www.cisco.com (d.d. 15 januari 2009) is gezocht naar 'mpls traffic engineering diffserv' voor een verklaring van dit verschil (het genoemde boek is van Cisco Press). Het eerste resultaat is een document waarin staat dat Cisco vroeger, voordat MAM en RDM bestonden, een eigen model had. Tegenwoordig worden MAM en RDM ook op Cisco routers ondersteund.* Verder beschrijven alle boeken vergelijkbare mogelijkheden.

Voor de theorie over recovery en protection heb ik de volgende hoofdstukken bestudeerd: Osborne & Simha (2002, hoofdstuk 7), Davie & Farrel (2008, hoofdstuk 7) en Minei & Lucek (2005, hoofdstuk 3). Ook in dit geval vond ik dezelfde mogelijkheden.

Met het bestuderen van de theorie over deze drie toepassingsgebieden heb ik voldoende kennis vergaard om antwoord te kunnen geven op deelvraag 4.

Deelvraag 6. Hoe effectief wordt een MPLS netwerk zonder Traffic Engineering technieken benut?
Nadat ik de literatuur analyse voor deelvraag 4 had gedaan en nadat ik deelvraag 5 had beantwoord, had ik voldoende kennis om deze deelvraag te beantwoorden. Verder heb ik dus geen literatuur bestudeerd voor deze deelvraag.

Deelvraag 7. Hoe zouden de gevonden Traffic Engineering technieken bij kunnen dragen aan het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?
Vanwege dezelfde reden als bij deelvraag 6, heb ik ook voor deelvraag 7 geen literatuur meer bestudeerd.

7. Projectfase: rapporteren

In dit hoofdstuk beschrijf ik hoe mijn onderzoeksrapportage tot stand is gekomen. De functie van de onderzoeksrapportage is het vastleggen van de antwoorden op de hoofd- en deelvragen. Zoals reeds enkele malen genoemd stelt Oost (2002, p. 15) eisen aan de antwoorden op (deel)vragen. Hieronder geef ik aan wat ik in deze fase heb gedaan om ervoor te zorgen dat mijn antwoorden controleerbaar, vakkundig, logisch, valide, betrouwbaar en adequaat zijn. Als een eis tijdens deze fase niet van toepassing is, geef ik dat hieronder aan.

Hoe ik bij de rapportage heb getracht zo goed mogelijk aan deze eisen te voldoen:

- Controleerbaar: het eerste gedeelte van de deelvragen (1 t/m 4) heb ik beantwoord met informatie die ik gevonden heb in de geselecteerde onderzoeksliteratuur. In al deze gevallen verwijs ik naar de bijbehorende literatuur. Hierdoor kan iedereen deze antwoorden controleren en reproduceren. De deelvragen 5 t/m 9 en de hoofdvraag zijn (deels) beantwoord door middel van een redenering. Ik heb geprobeerd om deze redeneringen stap voor stap te rapporteren en te onderbouwen met voorbeelden en argumenten. Hiermee zou voor iedereen duidelijk moeten zijn hoe ik tot de antwoorden ben gekomen. De laatste deelvraag heb ik beantwoord aan de hand van de resultaten van de praktijktesten. De bijbehorende testrapportage is gedetailleerd genoeg om de testen te kunnen herhalen.
- Vakkundig: deze eis is niet relevant voor de rapportage. Deze eis wordt gesteld aan de methode (strategie) die gebruikt is om tot het antwoord te komen. In de inleiding van hoofdstuk 5 en 6 heb ik hier al een toelichting op gegeven.
- Logisch: zoals ik al aangaf bij 'Controleerbaar' heb ik mijn redeneringen stap voor stap gerapporteerd en onderbouwd met voorbeelden en argumenten. Dit heb ik uiteraard niet alleen voor de controleerbaarheid door de lezer gedaan, maar ook om mezelf te controleren. Een voorbeeld hiervan geef ik bij deelvraag 5 later dit hoofdstuk.
- Valide: zoals eerder genoemd is een antwoord valide als er geen fouten in het systeem zitten dat gebruikt wordt om het antwoord te vinden. Mijn 'systeem' bestaat uit een literatuuronderzoek, redenaties en praktijktesten. Ik denk dat de kans op fouten in het literatuuronderzoek klein is. Door een goede zoekstrategie heb ik relevante onderzoeksliteratuur gevonden. Daarbij heb ik verschillende onafhankelijke boeken gebruikt voor het bepalen en controleren van mijn antwoorden. Bij 'Controleerbaar' en 'Logisch' heb ik al toegelicht hoe ik getracht heb de fouten in mijn redenaties zo klein mogelijk te houden. De praktijktesten zijn expres in het onderzoek opgenomen om de validiteit van andere antwoorden te controleren. De praktijktesten heten dan ook 'Proof of Concept'. Van een aantal voorbeeldnetwerken heb ik bij deelvraag 6 en 7 beredeneerd of de effectieve benutting toeneemt bij gebruik van MPLS Traffic Engineering technieken. Van een aantal van deze voorbeeldnetwerken heb ik de effectieve benutting ook in de praktijk gemeten. Hiermee heb ik gecontroleerd of ik de juiste effectiviteitcriteria heb bepaald.
- Betrouwbaar: voor de literatuurstudie heb ik gebruik gemaakt van drie onafhankelijke boeken. In deze boeken heb ik dezelfde of vergelijkbare informatie gevonden. Hiermee heb ik de kans op toevalsfouten in de gevonden informatie verkleind. Waardoor ook de kans op toevalsfouten in mijn antwoorden, die geheel of deels gebaseerd zijn op deze informatie, afneemt.

- Adequaat: per (deel)vraag heb ik gecontroleerd of mijn antwoord aansluit bij de gestelde vraag. Ik heb daarvoor de aanpak uit Oost (2002, p. 74-76) gebruikt. Ik geef hier voorbeelden van bij de deelvragen.

In de rest van dit hoofdstuk beschrijf ik per deelvraag hoe ik het antwoord op deze deelvraag gerapporteerd heb. Ik besluit het hoofdstuk met de rapportage van de hoofdvraag.

Deelvraag 1. Wat is een MPLS netwerk?
Het antwoord op deze vraag heb ik gegeven in hoofdstuk 2 van het onderzoeksrapport. Het doel van de vraag is om de lezer duidelijk te maken wat de globale werking van een MPLS netwerk is. Dat heb ik gedaan aan de hand van een voorbeeld MPLS netwerk, waarbij ik beschreven heb hoe een datapakketje door dat netwerk geforward wordt. Ik heb daarbij vooral geprobeerd om het globale idee dat datapakketjes binnen een MPLS netwerk geswitcht worden op basis van labels duidelijk te maken. Ik verwacht dat de beschrijving echter ook vragen oproept bij de lezer, zoals: "Hoe ziet zo'n label er uit?", "Hoe weet R2 nou welk label er op het pakketje moet?", "Hoe weet R3 waar het pakketje naar doorgestuurd moet worden?" en "Hoe komen de routers aan deze informatie?". Deze vragen heb ik in de rest van het hoofdstuk één voor één beantwoord. Daarmee heb ik de alle begrippen en concepten over MPLS behandeld die de lezer nodig heeft voor het begrijpen van de rest van het onderzoek.

Oost (2002, p.74) geeft aan dat de adequaatheid van vragen die beginnen met 'Wat..?' beantwoord moeten kunnen worden met 'Dat…'. Ik heb gecontroleerd of dat klopt: Wat is een MPLS netwerk? Dat is *een netwerk waarbij datapakketjes worden geswitched aan de hand van labels. De routers in het netwerken wisselen vooraf informatie uit over de te gebruiken labels en slaan deze informatie op in het cache geheugen, zodat de pakketjes zeer snel geswitched kunnen worden.* Hieruit heb ik geconcludeerd dat mijn vraag goed aansluit.

Deelvraag 2. Wat is Traffic Engineering?
In hoofdstuk 3 van het onderzoeksrapport heb ik deze vraag beantwoord. Doel van de vraag is om de afstudeerder en de lezer inzicht te geven in het begrip Traffic Engineering. Daartoe heb ik de beschrijvingen van het begrip Traffic Engineering uit de drie geselecteerde boeken gebruikt. Ten behoeve van de controleerbaarheid heb ik van alle drie de boeken literatuurverwijzingen naar de gevonden beschrijvingen opgenomen. Ik heb deze beschrijvingen in mijn eigen woorden overgenomen in de rapportage. Ik heb geconstateerd dat alle drie de boeken een vergelijkbare omschrijving van het begrip geven en dat daarmee de deelvraag beantwoord is.

Zelfde controle op adequaatheid als bij deelvraag 1. Wat is Traffic Engineering? Dat is *het beheersen van de route die dataverkeer door het netwerk neemt*. De *schuine* tekst is een van de gevonden omschrijvingen van het begrip Traffic Engineering. Hieruit heb ik geconcludeerd dat mijn vraag goed aansluit.

Deelvraag 3. Welke MPLS Traffic Engineering technieken zijn er?
Ik heb deze vraag beantwoord in hoofdstuk 4 van het onderzoeksrapport. Doel van de vraag is simpelweg om vast te leggen welke MPLS Traffic Engineering technieken er zijn. In alle drie de boeken werden de technieken ingedeeld naar drie verschillende toepassingsdoeleinden (toepassing voor 'Load Sharing', 'Quality of Service' en 'Restorarion en Protection'). Ik heb in de rapportage voor dezelfde indeling gekozen. Enerzijds omdat ik daarmee aansluit bij de in dit vakgebied gebruikelijke indeling. En anderzijds omdat ik het een logische indeling vind. Alle MPLS Traffic Engineering technieken zijn gebaseerd op het gebruik van tunnels. De configuratie van de tunnel bepaalt voor welk doel de tunnel gebruikt kan worden. Stel dat een gebruiker bijvoorbeeld wil weten wat er met MPLS Traffic Engineering tunnels mogelijk is ten aanzien van Quality of Service, dan vindt deze gebruiker, bij gebruik van deze indeling. alle informatie die hiermee te maken heeft in één (sub)hoofdstuk.

In de rapportage heb ik de toepassingsdoeleinden alvast kort toegelicht tezamen met de literatuurverwijzingen naar de hoofdstukken in de drie gebruikte boeken. Hiermee krijgt de lezer meteen een globale indruk van de mogelijke toepassingsdoeleinden.

Controle op adequaatheid van het antwoord: Welke MPLS Traffic Engineering technieken zijn er? Deze MPLS Traffic Engineering technieken zijn er:
- MPLS Traffic Engineering Load sharing technieken;
- MPLS Traffic Engineering Quality of Service (ofwel DiffServ) technieken;
- MPLS Traffic Engineering Recovery en Protection technieken.

Hieruit heb ik geconcludeerd dat mijn vraag goed aansluit.

Configureren van een MPLS Traffic Engineering tunnel
Zoals ik in hoofdstuk 6 (deelvraag 4) aangaf, heb ik Osborne & Simha (2002, H3 en 4) bestudeerd om meer te leren over het opzetten en configureren van tunnels. Tunnels zijn zeer belangrijk binnen MPLS Traffic Engineering. Bij deelvraag 3 gaf ik reeds aan dat alle MPLS Traffic Engineering technieken gebaseerd zijn op het gebruik van tunnels. Daarom heb ik besloten om in de onderzoeksrapportage een apart hoofdstuk (hoofdstuk 5) te wijden aan het opzetten van MPLS Traffic Engineering tunnels. In het hoofdstuk heb ik uitgelegd hoe de route van een tunnel berekend wordt en welke invloed de gebruiker op de route kan uitoefenen. Daarnaast ga ik in op het reserveren van bandbreedte voor deze tunnel. Door dit hoofdstuk op te nemen in mijn onderzoeksrapport wordt het voor de lezer duidelijker wat een tunnel is en welke opties er zijn bij het configureren van een tunnel. Ik vind deze informatie van essentieel belang voor het begrijpen van de rest van het rapport, omdat tunnels de basis vormen van MPLS Traffic Engineering en alle bijbehorende toepassingsdoeleinden.

Deelvraag 4. Welke mogelijkheden bieden de MPLS Traffic Engineering technieken?
Deze deelvraag heb ik beantwoord in hoofdstuk 6 van het onderzoeksrapport. In het hoofdstuk ben ik per toepassingsdoeleinde verder ingezoomd op de mogelijkheden. Voor elk toepassingsdoeleinde heb ik aan de hand van (minimaal) één voorbeeld netwerk uitgelegd hoe

MPLS Traffic Engineering technieken kunnen worden ingezet. Ik heb daarbij telkens uitgelegd wat de verschillen zijn tussen het netwerk met en zonder toepassing van MPLS Traffic Engineering technieken. De verschillen zitten met name in de route die de datapakketjes door het netwerk afleggen. Door de voorbeelden krijgt de lezer inzicht in de situaties waarin MPLS Traffic Engineering technieken de route van de datapakketjes op een nuttige manier kunnen beïnvloeden.

Controle op adequaatheid van het antwoord: Welke mogelijkheden bieden de MPLS Traffic Engineering technieken? Deze mogelijkheden beiden de MPLS Traffic Engineering technieken:

- met MPLS Traffic Engineering Load sharing technieken kan al het dataverkeer dat van A naar B getransporteerd moet worden, verdeeld worden over de beschikbare bandbreedte van alle mogelijk routes tussen punt A en B, ook als deze routes niet allemaal even lang/snel zijn.
- met MPLS Traffic Engineering DiffServ technieken kan de route van een pakketje door het netwerk worden afgestemd op de prioriteit van het pakketje. Daardoor is het mogelijk om pakketjes met een hoge prioriteit gedurende de hele route voorrang te verlenen boven pakketjes met een lage prioriteit.
- met MPLS Traffic Engineering Recovery en Protection technieken kan dataverkeer razendsnel (binnen 50 ms) worden omgeleid indien er een verbinding of router op de route van dat pakketje uitvalt. Hiermee kan het dataverlies dus beperkt worden tot 50 ms.

Hieruit heb ik geconcludeerd dat mijn vraag goed aansluit.

Deelvraag 5. Welke criteria bepalen de effectiviteit van de benutting van een (MPLS) netwerk?

Het antwoord op deze deelvraag heb ik gegeven in hoofdstuk 7 van het onderzoeksrapport. Het doel van de vraag is om inzichtelijk te maken welke factoren de effectieve benutting van een MPLS netwerk bepalen. Ik heb geprobeerd om de factoren via logisch redeneren te bepalen. Alle *schuine tekst* is afkomstig uit het onderzoeksrapport. Als eerste heb ik duidelijk gemaakt wat ik met het benutten van een netwerk bedoel, wat effectief is en wat iets effectief benutten dan is. Daaruit heb ik geconcludeerd dat 'iets effectief benutten' omschreven kan worden als: *'iets gebruiken zoals het bedoeld is'* . Volgende stap is bepalen waarvoor een netwerk bedoeld is. Een netwerk kan mijns inziens niets anders dan data transporteren en dat lijkt mij dan ook het doel van het aanleggen van een netwerk. Vervolgens heb ik geprobeerd te redeneren vanuit de eigenaar van een netwerk (bijv. een ISP). De eigenaar heeft mijns inziens als achterliggend doel om geld te verdienen aan het transporteren van data. De gebruiker betaalt de ISP immers om data over het netwerk te transporteren, bijvoorbeeld tussen kantoor A en B van de gebruiker. Hieruit heb ik geconcludeerd dat: *Data moet dus niet zomaar getransporteerd worden over het netwerk, maar gericht van A naar B.* Daarna geef ik aan dat ieder commercieel bedrijf in principe zoveel mogelijk wil verdienen met zo weinig mogelijk middelen. Waaruit ik heb geconcludeerd dat: *Wanneer een netwerk eenmaal is aangelegd, is het doel van een ISP dus om zoveel mogelijk data van gebruikers zo snel als mogelijk gericht over het netwerk transporteren.* Uit al deze stappen heb ik de ideale situatie vanuit de ISP omgeschreven: *In de ideale situatie (vanuit de ISP gezien) wordt de capaciteit van alle verbindingen gedurende 100% van de tijd voor 100% gebruikt,*

waarbij al het dataverkeer altijd via de snelste route van begin- naar eindpunt getransporteerd wordt. In die situatie wordt het netwerk het meest effectief benut.

Uit de beschrijving van de ideale situatie heb ik de volgende effectiviteitcriteria afgeleid:

1. *capaciteitsgebruik: het percentage van de beschikbare bandbreedte dat gebruikt wordt voor het transporten van data. Hoe hoger hoe beter, meest effectief is 100%;*
2. *het percentage van het verkeer dat de snelste route gebruikt. Hoe hoger hoe beter, meest effectief is 100%;* (de snelste route is daarbij gedefinieerd als die route die door het routing protocol op basis van het Shortest Path First algoritme als snelste/beste route wordt berekend)
3. *het percentage van het dataverkeer dat van het beginpunt naar het eindpunt getransporteerd wordt. Hoe hoger hoe beter, meest effectief is 100%.*

Ik heb tevens een toelichting op de criteria gegeven, waarbij ik heb onderbouwd waarom deze criteria belangrijk zijn voor de effectieve benutting van een netwerk. Daarnaast heb ik aangegeven dat er in sommige gevallen nog een vierde criterium bij komt, namelijk: *Wanneer QoS-afspraken met klanten zijn gemaakt, komt er nog een 4e criterium bij:*

4. *bij het transporteren van al het verkeer wordt rekening gehouden met bandbreedte garanties en garanties voor een lage delay.*

Deze criteria heb ik losgelaten op een voorbeeld netwerk om te bepalen of ik met deze criteria de totale effectiviteit van de benutting van een netwerk kan bepalen. Daartoe heb ik de vier criteria geschreven als factor (dus bijv. 80% capaciteitsgebruik = 0.80). Met als doel om deze factoren te kunnen vermenigvuldigen en als resultaat de totale effectieve benutting over te houden. Ik heb daarbij aangegeven dat: *Voordat de effectiviteitcriteria met elkaar vermenigvuldigd kunnen worden, dienen de factoren wel onafhankelijk van elkaar gemaakt te worden. Als de factoren niet onafhankelijk van elkaar zijn, wordt niet de juiste totale effectiviteit berekend.* Dat er in een aantal criteria nog een afhankelijkheid zat, heb ik onderbouwd aan de hand van het voorbeeld netwerk. Een voorbeeld van die onderbouwing: *Omdat 50% van de verstuurde data niet wordt afgeleverd, voldoet maar 50% van de data aan de gestelde QoS eisen. … Slechts 50% van de data voldoet aan de gestelde criteria* ***omdat*** *slechts 50% van de beschikbare capaciteit wordt gebruikt. Als wel 100% van de beschikbare capaciteit werd gebruikt, zou in dit geval ook 100% van het verkeer aan de QoS-eisen voldoen. Deze afhankelijkheid kan eruit gehaald worden door het QoS-criterium te herdefiniëren als: het percentage (geschreven als factor)* ***van het getransporteerde verkeer*** *dat aan de QoS-afspraken (garanties voor bandbreedte en lage delay) voldoet.* Nadat de criteria onafhankelijk zijn gemaakt, blijven de volgende drie criteria over:

De onafhankelijke criteria op een rij:

- *capaciteitsgebruik: het percentage (als factor) van de beschikbare bandbreedte dat gebruikt wordt voor het transporten van data van begin naar eindpunt.*
- *snelste route: het percentage (als factor) van het verkeer dat de snelste route gebruikt.* (de snelste route is daarbij gedefinieerd als die route die door het routing protocol op basis van het Shortest Path First algoritme als snelste/beste route wordt berekend).

- *QoS-afspraken: het percentage (als factor) van het getransporteerde verkeer dat aan de QoS-afspraken (garanties voor bandbreedte en lage delay) voldoet.*

Deze onafhankelijke criteria zullen tijdens de rest van het onderzoek worden gebruikt. De totale effectieve benutting is de factor die overblijft na vermenigvuldiging van de factoren van de drie criteria.

Daarmee heb ik de factoren bepaald die invloed hebben op de effectieve benutting van een netwerk. De deelvraag is daarmee dus beantwoord.

Controle op adequaatheid van het antwoord: Welke criteria bepalen de effectiviteit van de benutting van een (MPLS) netwerk? Deze criteria bepalen de effectiviteit van de benutting van een (MPLS) netwerk:

- capaciteitsgebruik: het percentage (als factor) van de beschikbare bandbreedte dat gebruikt wordt voor het transporten van data van begin naar eindpunt.
- snelste route: het percentage (als factor) van het verkeer dat de snelste route gebruikt. (de snelste route is daarbij gedefinieerd als die route die door het routing protocol op basis van het Shortest Path First algoritme als snelste/beste route wordt berekend).
- QoS-afspraken: het percentage (als factor) van het getransporteerde verkeer dat aan de QoS-afspraken (garanties voor bandbreedte en lage delay) voldoet.

Hieruit heb ik geconcludeerd dat mijn vraag goed aansluit.

Deelvraag 6. Hoe effectief wordt een MPLS netwerk zonder Traffic Engineering technieken benut?

Deelvraag 6 heb ik in hoofdstuk 8 van het onderzoeksrapport beantwoord. Doel van de deelvraag is het bepalen van de effectieve benutting van de referentiesituatie (zonder MPLS Traffic Engineering technieken). Ik heb de voorbeelden uit hoofdstuk 6 van het onderzoeksrapport nogmaals behandeld. Maar nu heb ik de voorbeeld netwerken beoordeeld aan de hand van de opgestelde effectiviteitcriteria (zie deelvraag 5). Met de effectiviteitcriteria heb de totale effectiviteit van de benutting van de voorbeeld netwerken bepaald.

Deze vraag is per voorbeeld netwerk beantwoord. Een voorbeeld van de controle op de adequaatheid van het antwoord: Hoe effectief wordt het voorbeeld MPLS netwerk (figuur 12 in de Onderzoeksrapportage) zonder Traffic Engineering technieken benut? 50% effectief wordt het voorbeeld netwerk zonder Traffic Engineering technieken benut. Voor de overige netwerken kan de vraag op dezelfde manier beantwoord worden. Hieruit heb ik geconcludeerd dat mijn vraag goed aansluit.

Deelvraag 7. Hoe zouden de gevonden Traffic Engineering technieken bij kunnen dragen aan het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?

Deelvraag 7 heb ik eveneens in hoofdstuk 8 van het onderzoeksrapport beantwoord. Doel van de vraag is inzichtelijk te maken op welke manier de MPLS Traffic Engineering technieken bij kunnen

dragen aan de effectievere benutting van een MPLS netwerk met standaard routering. Bij het beantwoorden van deelvraag 6 heb ik de effectieve benutting van een aantal voorbeeld netwerken zonder MPLS Traffic Engineering technieken bepaald. Van deze voorbeeld netwerken heb ik nu de effectieve benutting **met** MPLS Traffic Engineering technieken bepaald. Opnieuw aan de hand van de effectiviteitcriteria van deelvraag 5. Daarmee kan ik de effectieve benutting van deze voorbeeld netwerken met en zonder MPLS Traffic Engineering technieken vergelijken. Uit deze vergelijking blijkt of de verschillende voorbeeld netwerken wel of niet effectiever benut worden.

Ik heb de voorbeeld netwerken vervolgens vertaald naar wat meer algemene situaties:
In situaties met meerdere gelijke (equal cost) routes door het netwerk kunnen MPLS Traffic Engineering tunnels worden ingezet om delay gevoelig verkeer de juiste route te laten nemen. Dit verkeer kan over een route met verbindingen met een lage delay worden gestuurd.

In situaties met meerdere ongelijke routes (unequal cost) routes door het netwerk kunnen MPLS Traffic Engineering tunnels worden ingezet om de beschikbare capaciteit beter te benutten. Alle beschikbare capaciteit kan hierdoor worden benut.

In situaties waarbij het maximale percentage delay gevoelig verkeer op een verbinding beperkt dient te worden, kunnen DiffServe-Traffic Engineering tunnels worden ingezet voor een effectiever benutting. Hierdoor kan al het verkeer aan de QoS eisen voldoen.

In situaties waarbij een router of verbinding uitvalt kan de inzet van MPLS Traffic Engineering Fast Reroute tunnels ervoor zorgen dat de capaciteit veel effectiever wordt benut. Hiermee wordt de hoeveelheid data die verloren gaat na het uitvallen van een verbinding of router tot een minimum beperkt.

Een voorbeeld van de controle op de adequaatheid van het antwoord voor één van de vier hiervoor beschreven situaties: Hoe zouden de gevonden Traffic Engineering technieken bij kunnen dragen aan het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering? MPLS Traffic Engineering technieken kunnen bijdragen aan het effectiever benutten van een netwerk met standaard routering door tunnels aan te brengen in situaties met meerdere ongelijke routes van A naar B. Dit voorbeeld is voor MPLS Traffic Engineering load sharing technieken (unequal cost). Voor de andere technieken kan uit de hiervoor beschreven situaties op eenzelfde wijze een antwoord op de deelvraag worden geformuleerd.

8. Proof of Concept

Het doel van de Proof of Concept is om te bepalen of de MPLS Traffic Engineering technieken in de praktijk inderdaad voor een effectievere benutting zorgen. Tot op dit punt in het onderzoek heb ik de effectievere benutting van een MPLS netwerk met standaard routering alleen vanuit theoretisch oogpunt benaderd. Tijdens de Proof of Concept komt de praktische benadering aan bod. Zoals reeds bij de probleemstelling in hoofdstuk 4.1 beschreven hebben de praktijktesten een controlerende functie binnen dit onderzoek. Ik controleer enerzijds of de technieken daadwerkelijk werken en anderzijds of ik de theorie begrepen heb. Om de werking van de MPLS Traffic Engineering technieken in de praktijk aan te kunnen tonen, heb ik een aantal stappen doorlopen. Eerst heb ik de eisen aan de testnetwerken vastgesteld. Deze eisen heb ik vervolgens vertaald naar een aantal netwerkontwerpen. De ontworpen netwerken heb ik daarna gebouwd. De gebouwde netwerken heb ik onderworpen aan één of meerdere testen. Ik heb gekeken of de uitkomsten van de testen aan de verwachting voldeden. Indien dat zo was, heb ik de resultaten gerapporteerd. Indien de testen niet aan de verwachting voldeden, heb ik beschouwd of de testen dan wel de verwachting aangepast moesten te worden. Het proces van deze stappen voor één van de testnetwerken wordt in de rest van dit hoofdstuk beschreven. Eerst licht ik echter nog enkele keuzes toe die ik voorafgaand aan de Proof of Concept heb gemaakt.

8.1 Keuzes voorafgaand aan de Proof of Concept

Voor aanvang van dit onderzoek waren er veel onduidelijkheden omtrent het Proof of Concept gedeelte van dit onderzoek. Zo was bijvoorbeeld het aantal (toepassingsdoeleinden van) MPLS Traffic Engineering technieken onbekend. Ook was niet bekend welke factoren de effectieve benutting van een MPLS netwerk beïnvloeden en of de effectieve benutting met de beschikbare apparatuur gemeten kon worden. Door de opgedane kennis in het theoretisch gedeelte van dit onderzoek is er veel duidelijk geworden. Zo is er duidelijkheid over de toepassingsdoeleinden van de MPLS Traffic Engineering technieken die er zijn en over de factoren die de effectieve benutting beïnvloeden. Tevens is bekend wat er gemeten moet worden teneinde de effectieve benutting te bepalen. Op basis van deze kennis heb ik voorafgaand aan de Proof of Concept een aantal keuzes gemaakt, deze heb ik hierna toegelicht.

Eén testnetwerk per toepassingsdoeleinde

De eerste keuze die ik heb gemaakt, is om per toepassingsdoeleinde van MPLS Traffic Engineering één testnetwerk te bouwen. Ik heb dus één testnetwerk gebouwd voor 'Load sharing', één voor 'DiffServ (Quality of Service)' en één voor 'Protection en Recovery'. Reden voor deze keuze is dat omwille van de totale tijd van 17 weken voor dit onderzoek het niet mogelijk was om meerdere testnetwerken te bouwen per toepassingsdoeleinde. Zoals in hoofdstuk 7 beschreven heb ik per toepassingsgebied één of meerdere voorbeeld netwerken gegeven. Aan de hand van deze netwerken heb ik de mogelijkheden van de MPLS Traffic Engineering technieken beschreven. Tevens heb ik bepaald wat de effectieve benutting van de voorbeeld netwerken met en zonder MPLS Traffic Engineering is. Op basis van deze voorbeeld netwerken heb ik binnen 'Load sharing' gekozen voor een netwerk met 'Unequal cost load sharing'. Bij de beschrijving van de mogelijkheden van Unequal cost load sharing had ik al geconstateerd dat de ware kracht van

MPLS Traffic Engineering blijkt uit de mogelijkheid om load sharing toe te kunnen passen bij routes met een ongelijke cost. Dit werd onderschreven door de theoretische totale effectieve benutting van het voorbeeld netwerk met 'Unequal cost load sharing'. Ik heb dus geen netwerk met 'Equal cost load sharing' getest. Uit de literatuurstudie bleek dat 'Equal cost load sharing' kan worden ingezet om delay gevoelig verkeer de juiste route te laten nemen. Uit diezelfde literatuurstudie bleek echter ook dat middels DiffServ Traffic Engineering hetzelfde bereikt kan worden met een techniek die in feite nog geavanceerder is. DiffServ-Traffic Engineering kiest zoals bleek niet alleen de juiste route, maar controleert ook nog of er op die route voldoende bandbreedte beschikbaar is voor het delay gevoelig verkeer. Op basis van deze gronden heb ik besloten om wel een testnetwerk met 'Unequal cost load balancing' te bouwen, maar geen netwerk met 'Equal cost load balancing'.

Ontwerpen testnetwerken worden gebaseerd op voorbeeld netwerken

Tweede keuze die ik heb gemaakt, is om de ontwerpen van de testnetwerken te baseren op de voorbeeld netwerken die in hoofdstuk 8 van de onderzoeksrapportage behandeld zijn. Hiervoor heb ik een aantal redenen. Door deze keuze is het mogelijk om de theorie met de praktijk rechtstreeks te vergelijken. Als één van de voorbeeld netwerk in theorie bijvoorbeeld 20% effectiever benut wordt, zou dat in de praktijk ook zo moeten zijn. Als dat niet zo blijkt te zijn, is of de theorie, of de praktijktest onjuist. Deze vergelijking is dus tevens een controle op de juistheid van beiden. Wanneer een compleet ander netwerk wordt ontworpen, kan deze controle niet (eenvoudig) uitgevoerd worden. Een andere reden is dat er veel tijd is besteed aan de uitleg bij de voorbeeld netwerken. Het bleek vrij lastig om de totale effectieve benutting van een netwerk te bepalen en te omschrijven. Wanneer een ander netwerk ontworpen wordt, kost dit opnieuw veel tijd. Gezien de beperkte tijd leek het niet zinnig om een gedeelte van de resterende tijd hieraan te besteden, terwijl er al goed uitgewerkte voorbeelden beschikbaar waren.

Gebruik Cisco laboratorium

In het onderzoeksplan was aangegeven dat de testnetwerken ofwel met behulp van GNS3 of Dynamips geëmuleerd zouden worden ofwel in het Cisco laboratorium van de Haagse Hogeschool gebouwd zouden worden. Het Cisco laboratorium van de Haagse Hogeschool is het lokaal met Cisco apparatuur ten behoeve van practica. In beide gevallen wordt gebruik gemaakt van Cisco apparatuur. GNS3 en Dynamips zijn softwarepakketten waarmee alleen Cisco routers geëmuleerd kunnen worden. Het Cisco laboratorium bevat zoals de naam al aangeeft eveneens alleen Cisco routers.

Zoals ik in het onderzoeksplan al had aangegeven, zaten de grootste risico's voor dit onderzoek in de praktijktesten. Met de emulatiesoftware was er een kleine kans dat emulatie van netwerken met meer dan zes routers niet mogelijk zou zijn. Op één PC kunnen maximaal ongeveer zes routers geëmuleerd worden, het precieze aantal is afhankelijk van het geheugen van de PC en het type router dat geëmuleerd wordt. Bij meer dan zes routers zullen meerdere PC's gekoppeld moeten worden voor het uitvoeren van de emulatie. Voor de voorbeeld netwerken uit hoofdstuk 8 van de onderzoeksrapportage waren meer dan zes routers nodig. Daarmee zou het emuleren in ieder geval complexer worden, omdat ervaring met het gebruik van meerdere PC's voor het

emuleren van één netwerk ontbreekt. Naast dit risico was er vooraf onduidelijkheid over de manier waarop de effectieve benutting gemeten kon worden. Met het bepalen van de criteria voor de effectieve benutting was daar meer duidelijkheid over. Uit het voorbeeld netwerk van DiffServ Traffic Engineering bleek bijvoorbeeld dat de delay van datapakketjes gemeten moest worden om de Quality of Service eisen te toetsen. Het was de vraag of met de emulatiesoftware ook realistische delay metingen uitgevoerd konden worden. De processor van de PC waarop het netwerk geëmuleerd wordt, zou behoorlijk belast worden. De invloed van de processorbelasting op de emulatie en de delay van pakketjes was onduidelijk.

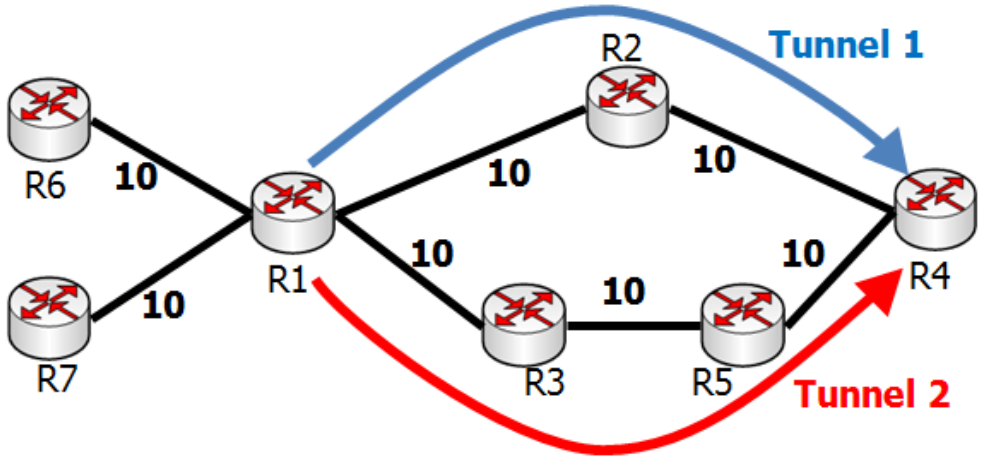
Er kleefden dus nogal wat risico's aan de emulatiesoftware. Daarom heb ik een inventarisatie van de apparatuur in het Cisco laboratorium gemaakt. Doel van de inventarisatie was om te bepalen in hoeverre de apparatuur in het Cisco laboratorium geschikt was om testnetwerken mee te bouwen. Uit de inventarisatie bleek dat er 16 routers zijn met een IOS (Internetwork Operating System, ofwel het besturingssysteem van de router) dat de MPLS Traffic Engineering technieken voor 'Load sharing' en 'DiffServ-Traffic Engineering' ondersteunt. Vier van deze routers hebben een IOS dat ook de MPLS Traffic Engineering technieken voor 'Recovery en Protection' ondersteunt. De 16 routers hebben allemaal twee FastEthernet interfaces. Van de 16 routers hebben 12 routers twee seriële interfaces en vier routers hebben vier seriële interfaces. Het aantal interfaces bepaalt met hoeveel andere routers de router verbonden kan worden. Het type interface bepaalt met welke snelheid de routers onderling verbonden kunnen worden. FastEthernet interfaces zijn 100 Mbps, seriële interfaces zijn instelbaar tot maximaal 8 Mbps. Uit de inventarisatie bleek dat er ook nog vier 'Pagent' routers in het laboratorium zijn. Dat zijn routers waarmee dataverkeer gegenereerd kan worden en waarmee de delay van dat dataverkeer gemeten kan worden. Zoals gezegd was het meten van de delay nodig om de Quality of Service eisen te toetsen bij DiffServ Traffic Engineering. Enige beperking die uit de inventarisatie bleek, was dus het aantal routers dat de MPLS Traffic Engineering technieken voor Recovery en Protection ondersteunt. Het voorbeeld netwerk in hoofdstuk 8 van de onderzoeksrapportage bestaat echter ook slechts uit vier routers. Het zou dus in ieder geval mogelijk moeten zijn om met vier routers een testnetwerk voor 'Recovery en Protection' te maken. Op basis van het voorgaande heb ik ervoor gekozen om de routers in het Cisco laboratorium te gebruiken voor de praktijktesten.

8.2 Eisen aan de testnetwerken

Ik heb de eisen aan de testnetwerken opgesteld aan de hand van de voorbeeld netwerken uit hoofdstuk 8 van de onderzoeksrapportage. Voor de duidelijkheid heb ik het voorbeeld netwerk van Unequal cost load sharing hierna opgenomen. Van dit netwerk leg ik uit hoe ik de eisen heb bepaald. Voor de overige twee testnetwerken heb ik op vergelijkbare wijze de eisen bepaald. Deze zijn terug te vinden in hoofdstuk 9 van de onderzoeksrapportage.

Het begrip cost verdient enige uitleg voorafgaand aan dit voorbeeld. Elke verbinding in het netwerk heeft een bepaalde cost (ook wel 'metric' genaamd), normaal gesproken wordt de cost gebruikt als maat voor de snelheid van die verbinding. Een snelle verbinding krijgt een lage cost, een langzame een hoge cost. De cost van alle verbindingen tussen het beginpunt en het eindpunt worden opgeteld, de snelste route is de route met de laagste totale cost.

Voorbeeld netwerk Unequal cost load sharing uit onderzoeksrapportage



Figuur 5. Voorbeeld unequal cost load sharing tussen tunnel 1 (blauw) en tunnel 2 (rood).

Alle verbindingen hebben een cost van 10, een snelheid van 100 Mbps en een lage delay. R6 en R7 versturen beiden data met 100 Mbps versturen naar R4, bij R1 arriveert dus 200 Mbps aan dataverkeer dat naar R4 moet. De enige Quality of Service (QoS) afspraak in dit voorbeeld is dat het verkeer afgeleverd wordt, er zijn dus geen afspraken over delay-gevoelig verkeer.

Tabel 3. Voorbeeld unequal cost load balancing

	Capaciteitsgebruik	***Snelste route***	***Voldaan aan QoS***	***Totale effectiviteit***
Zonder MPLS TE	*50%*	*100%*	*100%*	*50%*
Met MPLS TE	*100%*	*87.5%*	*100%*	*87.5%*

*In de situatie zonder MPLS Traffic Engineering stuurt R1 alle data echter naar de route met de laagste cost. R1 stuurt dus 200 Mbps naar een verbinding met een snelheid van slechts 100 Mbps. Hierdoor zal 100 Mbps verloren gaan, of op z'n minst opnieuw verstuurd moeten worden. In totaal is er tussen R1 en R4 200 Mbps aan capaciteit beschikbaar, 100 Mbps van R1→R2→R4 en 100 Mbps van R1→R3→R5→R4. De verbindingen van R1→R3→R5→R4 worden echter niet gebruikt, waardoor er worden dus slechts 100 van de 200 Mbps (50%) wordt gebruikt om data van het begin naar het eindpunt te transporteren. Het getransporteerde dataverkeer voldoet wel aan de gestelde QoS eisen (100%), dit wordt allemaal afgeleverd. Met MPLS Traffic Engineering wordt 200 Mbps van de beschikbare 200 Mbps gebruikt om data van begin naar eind getransporteerd (100%). Al het getransporteerde verkeer wordt afgeleverd, waardoor ook 100% aan de QoS eisen voldoet. 50% van het verkeer gaat door Tunnel 1 en gebruikt de snelste route, het andere verkeer gebruikt een route met een 1.33 keer zo hoge cost (40/30 =1.33, 40 is de cost van route R7→R1→R3→R5→R4 en 30 is de cost van route R6→R1→R2→R4). De effectiviteit van de route door Tunnel 2 is dus 1/1.33 = 75%. Het totaal percentage voor het gebruik van de snelste route is dan: 50%*100% + 50%* 75% = 87.5%.*

Eisen aan het netwerk met Unequal cost load sharing

Hierna volgt de lijst met de eisen aan het testnetwerk met Unequal cost load sharing. Onder deze lijst licht ik toe hoe ik aan deze eisen gekomen ben.

De eisen aan het netwerk met Unequal cost load sharing:

1. De testnetwerken moeten gebouwd kunnen worden met de aanwezige routers in het Cisco laboratorium van de HHS.
2. De testnetwerken dienen gebruik te maken van OSPF of IS-IS.
3. Alle routers dienen hun netwerkinformatie te delen.
4. Op alle MPLS Traffic Engineering routers dient een loopback interface met ip adres te worden aangemaakt.
5. Op alle routers dient Cisco Express Forwarding (CEF) en MPLS geactiveerd te worden.
6. Op alle routers in de situatie met MPLS Traffic Engineering dient MPLS Traffic Engineering geactiveerd te worden.
7. De verbindingen tussen R1, R2, R3, R4 en R5 moeten dezelfde bandbreedte hebben.
8. De route R1→R3→R5→R4 moet een 1.5 maal zo hoge cost hebben als de route R1→R2→R4.
9. Bij router R1 moet net zoveel dataverkeer aankomen als er totaal aan capaciteit beschikbaar is tussen R1 en R4. Dit is dus net zoveel dataverkeer als de routes R1→R2→R4 en R1→R3→R5→R4 samen kunnen verwerken.
10. In de situatie met MPLS Traffic Engineering dient een MPLS Traffic Engineering tunnel via de route R1→R2→R4 en een MPLS Traffic Engineering tunnel via de route R1→R3→R5→R4 aangebracht te worden.
11. In de situatie zonder MPLS Traffic Engineering dient aantoonbaar te zijn dat er geen dataverkeer gebruik maakt van de route R1→R3→R5→R4.
12. In de situatie zonder MPLS Traffic Engineering dient aantoonbaar te zijn hoeveel dataverkeer er bij R1 aankomt en hoeveel dataverkeer er in totaal bij R4 aankomt.
13. In de situatie met MPLS Traffic Engineering dient aantoonbaar te zijn hoeveel dataverkeer gebruik maakt van de route R1→R3→R5→R4 en hoeveel dataverkeer gebruik maakt van de route R1→R2→R4.
14. In de situatie met MPLS Traffic Engineering dient aantoonbaar te zijn hoeveel dataverkeer er bij R1 aankomt en hoeveel dataverkeer er in totaal bij R4 aankomt.

Toelichting bij de eisen:

ad1. Zoals ik in hoofdstuk 8.1 reeds heb toegelicht, zijn de testnetwerken gebouwd met de routers in het Cisco laboratorium van de HHS. Daar is ook reeds toegelicht dat het aantal routers, het IOS (het besturingssysteem) van de routers en het type en het aantal interfaces op de routers invloed heeft op de te bouwen testnetwerken. Op basis van een inventarisatie van de routers heb ik ingeschat dat deze invloed beperkt is en dat er voldoende geschikte apparatuur aanwezig is om de testnetwerken te kunnen bouwen.

ad2. Deze eis komt voort uit het algoritme dat MPLS Traffic Engineering tunnels gebruiken voor het bepalen van de beste tunnelroute. In hoofdstuk 5 van de onderzoeksrapportage (onder het kopje 'De route van de tunnel') heb ik uitgelegd dat de route van de tunnel met behulp van CSPF (Constrained Shortest Path First) wordt bepaald. CSPF is een variant op SPF, het

algortime dat routing protocollen OSPF en IS-IS gebruiken. SPF bepaalt vanaf één router de snelste route naar alle andere routers in het netwerk. De snelste route is de route met de laagste cost. Ik heb ook uitgelegd dat het algoritme CSPF gebruik maakt van gegevens die CSPF van OSPF of IS-IS krijgt. Netwerken waarin gebruik gemaakt wordt van MPLS Traffic Engineering tunnels kunnen hierdoor alleen in combinatie met het routing protocol OSPF of IS-IS worden toegepast. Zonder OSPF of IS-IS beschikt CSPF immers niet over voldoende gegevens om een tunnelroute te kunnen berekenen.

ad3. Met het delen van netwerkinformatie wordt bedoeld dat de routers in het netwerk elkaar informeren over alle netwerken die zij kunnen bereiken. Het routing protocol zorgt hiervoor, maar dit gaat niet vanzelf. Bij gebruik van OSPF dient bijvoorbeeld het commando 'network 10.0.0.0 0.0.0.3 area 0' ingevoerd te worden. Wanneer dit commando ingevoerd wordt op router R1, geeft R1 aan de andere routers in area 0 door dat netwerk 10.0.0.0 via R1 bereikt kan worden. Als deze netwerkinformatie niet wordt gedeeld, weten de routers niet hoe zij netwerk 10.0.0.0 moeten bereiken. In het voorbeeld netwerk wordt dataverkeer naar (een ip adres op) router R4 verstuurd, zonder netwerk informatie zouden de overige routers dus niet weten waar dit verkeer naartoe gestuurd moet worden. Om dat te voorkomen dienen alle routers dus hun netwerk informatie te delen.

ad4. Deze eis komt uit Osborne & Simha (2002, p.82), waar wordt aangegeven dat een loopback interface met ip adres noodzakelijk is voor het gebruik van MPLS Traffic Engineering. Het loopback ip adres wordt gebruikt als router id binnen het netwerk.

ad5. In Osborne & Simha (2002, p.82) wordt aangegeven dat CEF noodzakelijk is voor het gebruik van MPLS (Traffic Engineering). Op alle routers dient MPLS geconfigureerd te worden. In de voorbeeld netwerken wordt een vergelijking gemaakt tussen een MPLS netwerk met een zonder Traffic Engineering. In beide gevallen is een MPLS configuratie vereist. Dat geldt dus ook voor de testnetwerken.

ad6. In Osborne & Simha (2002, p.82) wordt aangegeven dat MPLS Traffic Engineering alleen werkt indien MPLS Traffic Engineering op alle routers globaal geactiveerd wordt. In alle testnetwerken dient dit dus te gebeuren in de situatie met MPLS Traffic Engineering.

De vorige zes eisen hebben betrekking op de te gebruiken routers en de instelling op deze routers die nodig zijn voor het verkrijgen van een werkend netwerk. Deze zes eisen gelden voor elk testnetwerk. Bij het opstellen van de volgende acht eisen heb ik meer specifiek naar het netwerk in figuur 5 gekeken. Eis 7 t/m 10 moeten ervoor zorgen dat de (fysieke) uitgangspunten (bijvoorbeeld capaciteit verbindingen, mogelijke routes) van het testnetwerk overeenkomen met het voorbeeld netwerk. Eis 11 t/m 14 moeten aantonen dat de werking van het testnetwerk overeenkomt met het voorbeeld netwerk. Daarbij heb ik gelet op de drie criteria die de totale effectieve benutting van het netwerk bepalen en op beweringen in de tekst. Een bewering bij de beschrijving van de situatie zonder MPLS Traffic Engineering is bijvoorbeeld: *De verbindingen van R1→R3→R5→R4 worden echter niet gebruikt.* In de praktijk dient gecontroleerd te worden of deze beweringen wel of niet juist zijn.

ad7. Deze eis heb ik opgenomen vanwege de effectiviteitcriteria 'capaciteitsgebruik' en 'snelste route'. Het deel dat betrekking heeft op het criterium snelste route heb ik bij de volgende eis

toegelicht. Het draait in het voorbeeld in figuur 5 om het gedeelte van het netwerk dat gevormd wordt door routers R1, R2, R3, R4 en R5. Al het dataverkeer dat aankomt bij R1 is bestemd voor R4. Om bij R4 te komen kan het verkeer (in principe) gebruikmaken van de route R1→R2→R4 en de route R1→R3→R5→R4. De totale beschikbare capaciteit is gelijk aan de maximale hoeveelheid dataverkeer die tegelijkertijd tussen punt A en B getransporteerd kan worden. In dit geval gaat het om transport tussen R1 en R4. De totale capaciteit is daarom gelijk aan de hoeveelheid data die via de route R1→R3→R5→R4 getransporteerd kan worden plus de hoeveelheid data die via de route R1→R2→R4 getransporteerd kan worden. In het voorbeeld is de bandbreedte (ofwel de hoeveelheid data die getransporteerd kan worden) van beide routes gelijk. Dat moet in het testnetwerk ook zo zijn, anders komt de berekening van de totale effectieve benutting niet overeen en kan geen eerlijke vergelijking worden gemaakt. Daarom moeten de verbindingen tussen deze routers dus dezelfde bandbreedte (ofwel snelheid) hebben. Deze eis hangt samen met de volgende eis.

ad8. Voor het effectiviteitcriterium 'snelste route' is de cost van de gebruikte route van belang. De cost van een verbinding is bij OSPF en IS-IS evenredig aan de bandbreedte van de verbinding. De totale cost van een route is de optelsom van de cost van alle verbindingen op die route. Als alle verbindingen tussen R1, R2, R3, R4 en R5 dezelfde bandbreedte (ofwel snelheid) hebben, is de cost van al deze verbindingen ook gelijk. De route R1→R3→R5→R4 bestaat uit drie verbindingen en de route R1→R2→R4 bestaat uit twee verbindingen. Daardoor ontstaat automatisch een verhouding van 3:2 = 1.5 tussen de totale cost van route R1→R3→R5→R4 en route R1→R2→R4. In het voorbeeld netwerk wordt overigens gerekend met de cost van de gehele route die het dataverkeer door het netwerk aflegt. Daar wordt dus gerekend met de verhouding tussen de cost van route R7→R1→R3→R5→R4 en de cost van route R6→R1→R2→R4. Uit deze verhouding komt 40/30 = 1.33 als verhouding. Het gaat er echter vooral om hoe het dataverkeer tussen R1 en R4 getransporteerd worden en niet zozeer om waar dat verkeer vandaan komt (dit wordt bij het netwerkontwerp in hoofdstuk 8.3 nader toegelicht).

ad9. Deze eis komt voort uit het effectiviteitcriterium voor capaciteitsgebruik. Zoals ik bij ad7 heb uitgelegd is de totale beschikbare capaciteit gelijk aan de hoeveelheid data die via de route R1→R3→R5→R4 getransporteerd kan worden plus de hoeveelheid data die via de route R1→R2→R4 getransporteerd kan worden. In het voorbeeld wordt de totale beschikbare capaciteit (200 Mbps) in de situatie met MPLS Traffic Engineering voor 100% gebruikt. Om de volle 100% (200 Mbps) aan beschikbare capaciteit te kunnen gebruiken, dient er natuurlijk wel genoeg dataverkeer (200 Mbps) bij R1 aan te komen. Om tot dezelfde totale effectieve benutting te kunnen komen als in het voorbeeld, dient er dus bij R1 in het testnetwerk ook net zoveel dataverkeer aan te komen als er totaal aan capaciteit beschikbaar is tussen R1 en R4.

ad10. Het voorbeeld netwerk in figuur 5 maakt bij de situatie met MPLS Traffic Engineering gebruik van twee MPLS Traffic Engineering tunnels (via de genoemde routes). Deze tunnels dienen in de praktijk ook aangebracht te worden. Het gaat immers om het vergelijken van het netwerk zonder deze tunnels en het netwerk met deze tunnels.

ad11. In het voorbeeld wordt gesteld dat er in de situatie zonder MPLS Traffic Engineering geen dataverkeer gebruik maakt van de route R1→R3→R5→R4. Om te controleren of dit in de

praktijk inderdaad niet gebeurt, heb ik deze eis opgenomen. Er zal door middel van testresultaten aangetoond moeten worden of de route inderdaad niet gebruikt wordt. Deze eis is belangrijk voor het berekenen van het effectiviteitcriterium capaciteitsgebruik.

ad12. In dezelfde situatie als bij ad11 wordt gesteld dat er bij R1 een bepaalde hoeveelheid data wordt aangevoerd, waarvan slechts de helft aankomt bij R4. Middels testresultaten dient aangetoond te worden hoeveel data er bij R1 wordt aangevoerd en hoeveel data er bij R4 aankomt. Uit de testresultaten die volgen uit eis 11 en 12, kan worden bepaald wat de totale effectieve benutting in de situatie zonder MPLS Traffic Engineering is. De totale effectieve benutting kan dan weer vergeleken worden met de effectieve benutting uit het voorbeeld om te controleren of de theorie overeenkomt met de praktijk.

ad13. Het voorbeeld stelt dat het dataverkeer in de situatie met MPLS Traffic Engineering zowel gebruik maakt van de route R1→R3→R5→R4 als van de route R1→R2→R4. Testresultaten dienen aan te tonen dat dit inderdaad zo is en ook hoeveel data er dan gebruikmaakt van beide routes. Deze eis is belangrijk voor het berekenen van het effectiviteitcriterium capaciteitsgebruik en het berekenen van het criterium snelste route.

ad14. Ook voor de situatie met MPLS Traffic Engineering dient middels testresultaten aangetoond te worden hoeveel data er bij R1 wordt aangevoerd en hoeveel data er bij R4 aankomt. Uit de testresultaten die volgen uit eis 13 en 14, kan worden bepaald wat de totale effectieve benutting in de situatie zonder MPLS Traffic Engineering is. De totale effectieve benutting kan dan weer vergeleken worden met de effectieve benutting uit het voorbeeld om te controleren of de theorie overeenkomt met de praktijk.

8.3 Ontwerp testnetwerk Unequal cost load sharing

De volgende stap die ik heb gezet, is het vertalen van de eisen naar een netwerkontwerp. Voordat ik in ga op het netwerkontwerp, geef ik eerst een toelichting op enkele algemene ontwerpkeuzes en het gebruik van de Pagent routers bij de testen.

Gebruik OSPF voor alle testnetwerken

Ik heb bij de eisen al aangegeven dat alle testnetwerken gebruik dienen te maken van OSPF of IS-IS. In Osborne & Simha (2002, p.82) wordt aangegeven dat de meeste configuratie opties door beide routing protocollen worden ondersteund. Op enkele plaatsen wordt aangegeven dat bepaalde configuratie opties alleen door OSPF of IS-IS worden ondersteund. Deze configuratie opties zijn niet nodig voor de testnetwerken. Voor de testnetwerken maakt het dus niet uit welk routing protocol gebruikt wordt. Ik heb gekozen voor OSPF als routing protocol omdat ik beter bekend ben met OSPF dan IS-IS. Ik heb de keuze vooral gemaakt omdat ik daarmee wat tijd kon besparen omdat ik me niet hoefde te verdiepen in IS-IS. Gezien de beperkte tijd van dit onderzoek kon ik deze tijd beter gebruiken voor de uitvoering van de praktijktesten dan het bestuderen van de werking van IS-IS. Binnen OSPF heb ik alle routers in area 0 geplaatst. Het gebruik van meerdere area's voor de testnetwerken zou de ontwerpen nodeloos ingewikkeld maken.

Gebruik loopback interface als router ID

Zoals bij eis 4 is aangegeven, is het gebruik van een loopback interface noodzakelijk voor het kunnen gebruiken van MPLS Traffic Engineering. In alle netwerkontwerpen wordt voor elke router

een loopback interface aangemaakt. Het ip adress heb ik duidelijk herkenbaar gemaakt, voor R1 heb ik 1.1.1.1 gebruikt, voor R2 2.2.2.2 enz. Bij het bespreken van het netwerkontwerp wordt dit niet nogmaals genoemd.

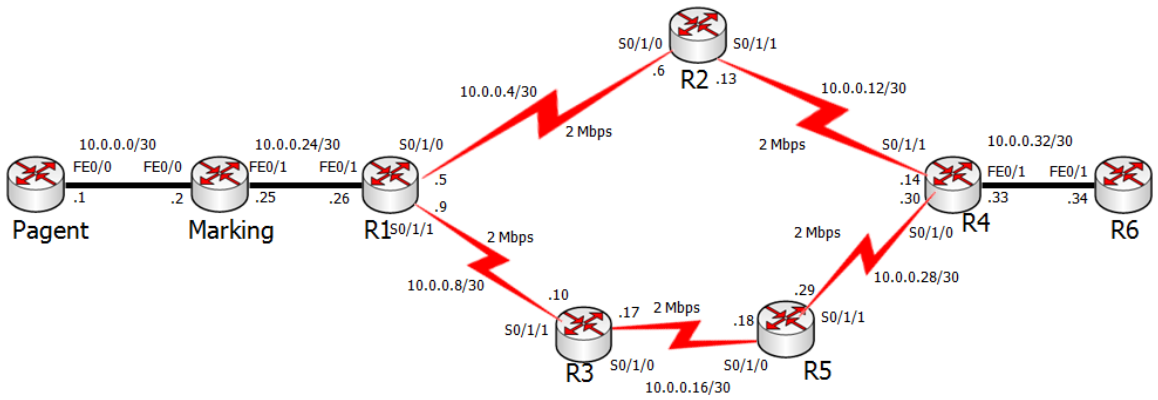
Gebruik CEF en MPLS (Traffic Engineering)
Zoals bij eis 5 en 6 is aangegeven, is het gebruik van Cisco Express Forwarding en MPLS een vereiste voor alle routers (de Pagent routers uitgezonderd). In alle netwerkontwerpen wordt CEF en MPLS geactiveerd. Voor het gebruik van MPLS Traffic Engineering is het activeren van MPLS Traffic Engineering op alle routers noodzakelijk. In alle netwerkontwerpen wordt MPLS Traffic Engineering dus geactiveerd in de situatie met MPLS Traffic Engineering. Bij het bespreken van het netwerkontwerp worden voorgaande configuraties niet nogmaals genoemd, tenzij er afwijkingen zijn.

Gebruik Pagent routers
Zoals uit de inventarisatie bleek, zijn er in het Cisco laboratorium ook Pagent routers aanwezig. Dat zijn routers met een Pagent module, met deze module kan dataverkeer gegenereerd worden. Hoe dit dataverkeer er uit moet zien is vrijwel volledig instelbaar. Zo kan bijvoorbeeld ingesteld worden hoe groot (in bytes) de pakketjes moeten zijn en hoeveel pakketjes per seconden er verstuurd moeten worden. Tevens zijn alle headers (bijv. Ethernet, IP en TCP header) instelbaar. In de IP header kunnen onder andere het source en destination IP adres en de prioriteit van het pakketje worden ingesteld. Met één Pagent module kunnen meerdere verschillende verkeerstromen (flows) tegelijk worden gegenereerd.

Naast deze opties kan de Pagent module ook gebruikt worden voor Quality of Service metingen. Daarbij worden de pakketjes niet alleen verstuurd vanaf de Pagent router, maar ook weer opgevangen door de Pagent router. Van deze pakketjes wordt de in het netwerk opgelopen delay gemeten. Tevens wordt bijgehouden of er pakketjes gedropt zijn in het netwerk. De delay en drop statistieken kunnen per flow worden bekeken op de Pagent router.

Bij aanvang van de eerste testen bleek dat de beschikbare documentatie van de Pagent module zeer summier was. Daarom heb ik de Pagent handleiding opgevraagd bij de beheerder (Richard Arends) van het HHS Cisco laboratorium. Deze handleiding maakte veel duidelijk over het gebruik van de Pagent module. Tijdens het ontwerp en de testen van Unequal cost load sharing, was de handleiding echter nog niet beschikbaar. Daarom heb ik de mogelijkheden van de Pagent router bij Unequal cost load sharing niet volledig kunnen benutten. Bij de toelichting op het netwerkontwerp heb ik aangegeven op welke punten het netwerk zou verschillen als ik wel de beschikking over de handleiding had gehad.

In figuur 6 wordt het netwerkontwerp voor Unequal cost load sharing weergegeven (een groter formaat van deze figuur is te vinden in de externe bijlage Netwerkconfiguraties). Onder de figuur heb ik het netwerkontwerp nader toegelicht.



Figuur 6. Netwerkontwerp voor Unequal cost load sharing

De Pagent router is van het type 2621, alle overige routers zijn van het type 2801. Op alle routers wordt OSPF gebruikt als routing protocol. Op router R1 t/m R5 wordt naast OSPF ook MPLS geactiveerd. Het draait bij dit netwerkontwerp allemaal om de datastromen tussen de routers R1 t/m R5. De routers Pagent, Marking en R6 heb ik toegevoegd om de testen ten behoeve van het bepalen van de totale effectieve benutting mogelijk te maken of te vergemakkelijk.

Alle verbindingen tussen R1, R2, R3, R4 en R5 hebben dezelfde bandbreedte (2 Mbps) gekregen, daarmee heb ik aan de zevende ontwerpeis voldaan. Omdat OSPF de cost bepaalt op basis van de bandbreedte hebben alle verbindingen ook dezelfde cost. Hierdoor heb ik aan de achtste ontwerpeis voldaan. In het voorbeeld van figuur 5 stuurden twee routers (R6 en R7) data naar R1. Dat het dataverkeer afkomstig is van twee routers is verder niet relevant voor de totale effectieve benutting. Zoals ik heb uitgelegd bij de eisen in hoofdstuk 8.2 gaat het erom hoe deze data van R1 naar R4 verstuurd wordt en niet waar deze data vandaan komt. Daarom heb ik in dit netwerkontwerp gebruik gemaakt van één Pagent router die al het dataverkeer genereert. Al het door de Pagent gegenereerde dataverkeer wordt verstuurd naar ip adres 6.6.6.6. Dit is het ip adres van de loopback0 interface op router R6. De gebruikte Pagent router genereerde bij een testmeting ca. 12 Mbps. Vanwege de negende ontwerpeis mag de bandbreedte van de verbindingen tussen R1 t/m R5 niet groter zijn dan 6 Mbps. Bij een bandbreedte groter dan 6 Mbps wordt de totale beschikbare capaciteit tussen R1 en R4 hoger dan 12 Mbps en wordt niet meer voldaan aan de ontwerpeis. In dat geval zou de Pagent router te weinig verkeer genereren om 100% van de beschikbare capaciteit te kunnen gebruiken. Ik heb besloten om een veilige marge aan te houden ten opzichte van de maximaal toegestane bandbreedte van 6 Mbps. Daarom heb ik gekozen voor 2 Mbps, wat de totale beschikbare capaciteit op 2+2=4 Mbps brengt.

De router Marking in het ontwerp heb ik gebruikt om de 12 Mbps die door de Pagent router gegenereerd wordt, terug te brengen naar 4 Mbps. Dit heb ik gedaan door policing op interface FastEthernet 0/1 (FE). Hiermee heb ik voldaan aan de negende ontwerpeis. Er komt hierdoor immers 4 Mbps aan bij router R1 en 4 Mbps is gelijk aan de totale capaciteit. Zoals aangegeven was de handleiding van de Pagent module ten tijde van het opstellen van dit ontwerp niet beschikbaar. Als deze wel beschikbaar was geweest, zouden de routers Marking en R6 weggelaten zijn in het ontwerp. In dat geval zou de Pagent module zo zijn ingesteld dat deze precies de

benodigde hoeveelheid data van 4 Mbps zou genereren. Daarmee zou de router Marking overbodig geworden zijn. Ook zou in dat geval een verbinding aangebracht zijn van router R4 terug naar de Pagent router. Door deze verbinding zou het mogelijk zijn om op de Pagent router te bepalen hoeveel van de gegenereerde 4 Mbps aan dataverkeer er bij R4 het netwerk weer verlaat. Voor het doel van dit testnetwerk, namelijk het aantonen van de datastromen en de totale effectieve benutting, heeft dit alles weinig tot niets uit gemaakt. Er staat *weinig* tot niets omdat de Pagent router de totale datastroom mogelijk iets nauwkeuriger kan meten dan de methode die nu is gebruikt. Als dat zo is, zal het verschil echter zowel met als zonder MPLS Traffic Engineering gemeten worden en maakt het voor de vergelijking tussen de beide situaties vrijwel niets uit.

In de situatie met MPLS Traffic Engineering heb ik twee MPLS Traffic Engineering tunnels aangebracht. Eén MPLS Traffic Engineering tunnel via de route R1→R2→R4 en één MPLS Traffic Engineering tunnel via de route R1→R3→R5→R4. Met het commando 'show mpls traffic-eng tunnels' kan de route van de MPLS Traffic Engineering tunnels worden getoond. Daarmee heb ik aan de tiende ontwerpeis voldaan.

De eisen 11 t/m 14 hebben allemaal betrekking op het aantoonbaar maken van datastromen tussen R1 t/m R5. Deze datastromen worden zowel in de situatie met als zonder MPLS Traffic Engineering inzichtelijk gemaakt door show interface commando's. Wanneer bijvoorbeeld op router R2 het commando 'show interface S0/1/0' wordt gegeven, wordt de hoeveelheid data getoond die deze interface heeft verstuurd en ontvangen. Door dit commando op alle aangesloten interfaces van R1 t/m R5 te geven, wordt precies duidelijk hoeveel data er over de verbindingen tussen de routers verstuurd wordt. Door dit commando op interface FE0/1 van router R6 te geven, wordt in een oogopslag duidelijk hoeveel van de gegenereerde 4 Mbps er bij R6 aankomt.

Met dit ontwerp en de gegeven commando's zou het mogelijk moeten zijn om het voorbeeld uit figuur 5 in de praktijk te testen.

8.4 Bouwen testnetwerken

Het ontwerp heb ik vertaald naar configuraties. De configuraties van alle routers zijn te vinden in de externe bijlage Netwerkconfiguraties. Hieronder heb ik een toelichtingen gegeven op een gedeelte van de configuratie van router R1 in de situatie met MPLS Traffic Engineering. Ik heb hiermee onder andere duidelijk gemaakt hoe een MPLS Traffic Engineering tunnel geconfigureerd wordt, hoe CEF en MPLS geactiveerd worden, op welke wijze bandbreedte gereserveerd wordt op een verbinding en hoe MPLS Traffic Engineering en OSPF geconfigureerd worden. Daarmee heb ik geprobeerd duidelijk te maken hoe de eisen en het ontwerp vertaald zijn in de echte configuratie. Tussen de stukjes configuratie heb ik de configuratie `commando's` toegelicht. Ik heb de configuratie van één tunnel en één seriële interface toegelicht. Andere tunnels en interfaces kunnen op een vergelijkbare manier worden geconfigureerd.

globale configuratie commando's

```
hostname R1
ip cef
mpls label protocol ldp
mpls ldp router-id Loopback0
mpls traffic-eng tunnels
```

Met hostname wordt de routernaam ingesteld. Ip cef activeert Cisco Express Forwarding (ontwerpeis 5). Met mpls label protocol ldp wordt LDP ingesteld als label distributie protocol. Andere optie was TDP, dit protocol is Cisco proprietary, de werking is vrijwel hetzelfde LDP. Omdat de werking niet uitmaakt en LDP open standaard is (dus met alle merken routers kan werken) heb ik voor LDP gekozen. Met het mpls ldp router-id Loopback0 commando wordt het ip adres van interface loopback0 ingesteld als router-id bij het label distributie proces. In Osborne & Simha (2002, p.53) wordt aangeraden om het loopback 0 ip adres als router id voor MPLS te gebruiken. Een loopback interface is altijd 'up', hierdoor zal de router id niet plotseling veranderen, wat de stabiliteit van het label distributie proces ten goede komt. Mpls traffic-eng tunnels is het commando om MPLS Traffic Engineering globaal te activeren (eis 6).

loopback interface

```
interface Loopback0
 ip address 1.1.1.1 255.255.255.255
```

Op alle routers is een loopback interface geconfigureerd. Als herkenbaar ip adres is voor R1 1.1.1.1 als ip adres gebruikt, voor R2 2.2.2.2 enz.

configuratie MPLS Traffic Engineering tunnel

```
interface Tunnel1
 bandwidth 2000
 ip unnumbered Loopback0
 ip load-sharing per-packet
 tunnel destination 4.4.4.4
 tunnel mode mpls traffic-eng
 tunnel mpls traffic-eng autoroute announce
 tunnel mpls traffic-eng priority 0 0
 tunnel mpls traffic-eng bandwidth 2000
 tunnel mpls traffic-eng path-option 10 explicit name tun1
 no routing dynamic
```

Voor het configureren van een MPLS Traffic Engineering tunnel wordt een universele tunnel interface gebruikt (commando interface Tunnel1),die bijvoorbeeld ook voor GRE tunnels of VPN tunnels wordt gebruikt. Het commando tunnel mode mpls traffic-eng geeft vervolgens aan dat het type tunnel een MPLS Traffic Engineering tunnel is. Het bandwidth commando geeft de bandbreedte in kbps van de interface aan het routing protocol door. Met het ip unnumbered Loopback0 commando wordt het ip adres van interface loopback0 ingesteld als ip adres van de tunnel1 interface. Zonder ip adres weigert het IOS (besturingssysteem router) om dataverkeer naar de interface te sturen. Omdat MPLS Traffic Engineering tunnels geen verkeer kunnen ontvangen (MPLS Traffic Engineering zijn één richtingsstraten) is het niet nodig om een uniek ip

adres te gebruiken. Daarom is het dus handig om hiervoor het loopback0 ip adres te gebruiken. Het ip load sharing per packet commando wordt normaal gesproken niet gebruikt. Standaard wordt load sharing per flow toegepast, daarbij is elke afzonderlijke combinatie van source en destination ip adres één flow. De verschillende flows worden dan verdeeld over de interfaces die naar het destination ip adres leiden. Dus als er twee (tunnel) interfaces naar ip adres 4.4.4.4 leiden, zullen alle flows met destination ip adres 4.4.4.4 verdeeld worden over deze twee (tunnel) interfaces. Door de instelling op de Pagent router was er in dit testnetwerk slechts 1 flow, daarom is gebruik gemaakt van 'per packet load sharing'. Op één flow wordt normaal gesproken geen load sharing toegepast. Reden hiervoor is dat de pakketjes in die flow mogelijk 'uit volgorde' bij de bestemming aankomen omdat de ene route sneller kan zijn dan de andere. Voor deze testen maakt het niet uit als de pakketjes uit volgorde aankomen en kan dus per packet load sharing gebruikt worden. Het tunnel destination 4.4.4.4 commando stelt ip adres 4.4.4.4 in als eindpunt van de tunnel. Met het commando tunnel mpls traffic-eng autoroute announce wordt de tunnel gepropageerd naar het routing protocol. Hierdoor wordt de tunnel in de routing tabel opgenomen en kunnen alle datapakketjes gebruikmaken van de tunnel. De setup en hold priority van de tunnel worden ingesteld met het commando tunnel mpls traffic-eng priority 0 0. Voor beide priority waarden geldt hoe lager hoe beter. Voor dit testnetwerk maakt het niet uit welke priority gekozen wordt, maar in situaties waarbij meerdere tunnel concurreren om dezelfde verbinding(en) maakt dit wel uit. Als de setup priority van een nieuwe tunnel lager is dan de hold priority van een reeds bestaande tunnel, kan de bestaande tunnel worden verwijderd. De bestaande tunnel dient dan een nieuwe route te zoeken. In dit testnetwerk worden twee tunnels over onafhankelijke routes geconfigureerd, daarom maakt de setup en hold priority niet uit. Met het commando tunnel mpls traffic-eng bandwidth 2000 wordt 2000 kbps aan bandbreedte gereserveerd voor deze tunnel. Het commando tunnel mpls traffic-eng path-option 10 explicit name tun1 geeft aan dat de expliciete tunnelroute met de naam tun1 gebruikt moet worden als tunnelroute. De expliciete tunnelroute met de naam tun1 wordt later toegelicht. Voor een tunnel kunnen verschillende path-options worden ingesteld. De laagste path-option wordt eerst geprobeerd (in deze configuratie dus nummer 10, want er is er maar één). Hier wordt gebruik gemaakt van een expliciete route, maar er kan ook voor een dynamische route (is met behulp van CSPF) gekozen worden. Voor de werking maakt het niet uit. Ik heb in dit netwerk een expliciete route gebruikt en bijvoorbeeld bij het DiffServ Traffic Engineering netwerk een dynamische route. Hierdoor heb ik beide configuratievormen een keer gebruikt. Het no routing dynamic wordt automatisch op MPLS Traffic Engineering tunnel interfaces ingesteld. Het commando voorkomt dat er routing updates via deze interface worden verstuurd.

Configuratie expliciete tunnelroute

```
ip explicit-path name tun1 enable
 next-address 10.0.0.6
 next-address 10.0.0.14
```

Met het commando ip explicit-path name tun1 enable wordt er een expliciete route met de naam tun1 gecreëerd. De next-adres commando's geven de ip adressen van de router interfaces tussen begin en eindpunt. Voor tunnel1 zijn dit de ip adressen van interface S0/1/0 van R2, interface S0/1/1 van R4 en het ip adres van de loopback 0 interface van R4 (zie figuur 6).

configuratie (seriële) interface

```
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 clock rate 2000000
 ip address 10.0.0.5 255.255.255.252
 ip load-sharing per-packet
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 ip rsvp bandwidth 2000
 no shutdown
```

Met het commando interface serial0/1/0 kan deze interface worden geconfigureerd. Het bandwidth 2000 commando geeft de ingestelde bandbreedte (2000 kbps) door aan het routing protocol. Dit is belangrijk omdat het routing protocol deze bandbreedte gebruikt om de cost van de verbinding te bepalen. Het clock rate 2000000 commando stelt de seriële interface in op 2 Mbps. Aan beide kanten van de seriële interface dient dezelfde clock rate ingesteld te worden. Het ip address commando stelt het ip adres van deze interface in (conform figuur 6 in hoofdstuk 8.3). Het ip load sharing per-packet commando is reeds toegelicht bij de tunnel1 interface. Met mpls ip wordt mpls geactiveerd op deze interface. Het commando mpls mtu 1504 zorgt ervoor dat de maximum transmission unit (mtu = grootte van een pakketje in bytes) wordt verhoogd van de standaardwaarde 1500 naar 1504. Deze 4 bytes extra zijn nodig vanwege het MPLS label van 4 bytes dan aan ieder pakketje wordt toegevoegd. Het commando mpls traffic-eng tunnels activeert MPLS Traffic Engineering op deze interface. Met het commando ip rsvp bandwidth 2000 wordt aangegeven dat er op deze interface 2000 kbps gereserveerd kan worden. Bij het opzetten van een tunnel wordt gekeken of er op de gehele tunnelroute voldoende bandbreedte beschikbaar is voor de tunnel. Als dit niet zo is, wordt indien mogelijk een andere route gezocht. Het no shutdown commando zorgt ervoor dat de interface 'up' blijft.

OSPF configuratie

```
router ospf 1
 mpls traffic-eng router-id Loopback0
 mpls traffic-eng area 0
 log-adjacency-changes
 network 1.1.1.1 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.4 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.8 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.24 0.0.0.3 area 0
!
```

Met het commando router ospf 1 kan OSPF worden geconfigureerd. Er kunnen meerdere OSPF processen op één router draaien vandaar dat er een proces-id (in dit geval nummer 1) meegegeven wordt. Bij de testnetwerken is er slechts één OSPF proces nodig. Het commando mpls traffic-eng router-id Loopback0 zorgt ervoor dat het ip adres van interface loopback0 als router-id gebruikt wordt voor het MPLS Traffic Engineering. Bij de ontwerpeisen was al uitgelegd dat dit noodzakelijk is. Met het commando mpls traffic-eng area 0 wordt MPLS Traffic Engineering geactiveerd in OSPF area 0. Alle routers worden, zoals eerder uitgelegd, in OSPF area 0 geplaatst.

Het commando log-adjacency-changes zorgt ervoor dat meldingen over de convergentie van OSPF getoond worden. Voor de werking van het testnetwerk maakt dit niets uit, maar het is handig tijdens het testen. Als er bijvoorbeeld een router uitvalt, wordt dit in beeld (het router configuratiescherm) getoond. De network commando's zorgen ervoor dat de informatie over de netwerken die R1 kan bereiken (aangrenzende netwerken en loopback0 netwerk) wordt gedeeld met andere routers in area 0. Dit is het delen van netwerk informatie van de derde ontwerpeis.

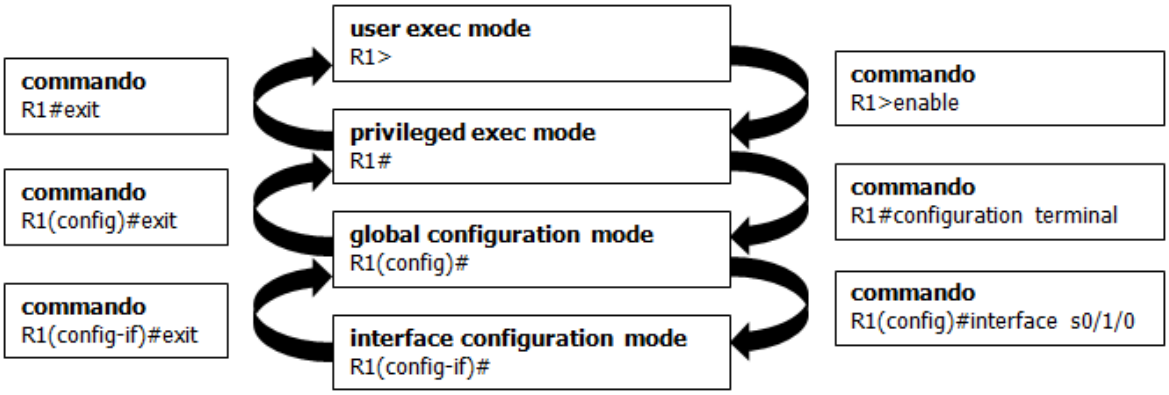
Ik heb na het opstellen van alle configuraties gecontroleerd of hiermee aan alle ontwerpeisen die betrekking hebben op de configuratie (eis 1 t/m 10) werd voldaan. Dat was inderdaad het geval, waarmee deze configuratie geschikt zou moeten zijn voor de testen.

8.5 Opstellen testplan

Het doel van de testen in het testplan is om middels testresultaten aan te tonen dat het testnetwerk in de praktijk net zo werkt als in de theoretische voorbeelden. Kortom om aan te tonen dat de praktijk overeenkomt met de theorie. Ik heb er bij het opstellen van het testplan en de testbeschrijvingen op gelet dat de testen zo gedetailleerd worden beschreven dat iemand anders dan ik de testen zou moeten kunnen herhalen. Ik heb in een stappenplan uitgelegd hoe de configuraties (externe bijlage) daadwerkelijk op de routers geconfigureerd kunnen worden. Na de configuratie toelichting heb ik beschreven hoe de Pagent routers gebruikt moeten worden bij de testen. Ook heb ik uitgelegd hoe de tester om moet gaan met een instructie zoals '`R6#show ip route`'. Hieronder staan een figuur en een stukje tekst om de gedetailleerdheid te illustreren.

Voorbeeld uit testplan

De routers hebben verschillende modes waarop commando's gegeven kunnen worden. Figuur 1 geeft deze mode weer voor een router met de naam R1.



Figuur 7. De verschillende router modes en commando's om tussen de modes te wisselen

Vanuit global configuration mode kunnen verschillende modes bereikt worden. Dit voorbeeld gebruikt de interface configuration mode, wat te zien is aan de aanduiding `(config-if)#`*. Als bij de testen aangegeven wordt, geef het commando '*`R6#show ip route`*', dan is dat het commando 'show ip route' op router R6 in priveleged exec mode. Het is dan de bedoeling dat de console kabel met router R6 wordt verbonden, dat middels de commando's in figuur 7 naar de priveleged exec mode wordt gegaan en dat in deze mode het commando 'show ip route' wordt getypt gevolgd door een druk op Enter.*

Testen netwerk Unequal cost load sharing

Ik heb in het testplan aangegeven dat voor alle 'Unequal cost load sharing' testen de netwerktopologie uit figuur 6 gebruikt moet worden. Per test heb ik de te gebruiken configuraties aangegeven en waar deze te vinden zijn. Tevens heb ik het doel van de test kort omschreven, dat maakt voor anderen duidelijk wat ik met de test aan wil tonen. Zij kunnen dan tevens controleren of ik daarvoor de juiste methode gebruik. Vervolgens heb ik de uit te voeren handelingen en commando's gegeven. Voor de duidelijkheid heb ik voor de `commando's` een ander lettertype gekozen. Na de uit te voeren handelingen heb ik de verwachte uitkomst gegeven. In dit geval gaat het om de situatie zonder MPLS Traffic Engineering. Ik verwacht dan ook dat de route R1→R3→R5→R4 niet gebruikt zal worden, dus op alle interfaces van die route verwacht ik 0 bits/sec. Op de route R1→R2→R4 verwacht ik op alle interfaces 2.000.000 bits/sec (2 Mbps), wat gelijk is aan de maximale bandbreedte van de verbindingen. Ten slotte is er ruimte voor de gevonden resultaten en wordt de vraag gesteld of de resultaten aan de verwachte uitkomst voldoen. Met de resultaten van deze test weet ik hoe alle datastromen in de situatie zonder MPLS Traffic Engineering verlopen en is het doel van de test bereikt. Daaruit kan ik de effectiviteitcriteria capaciteitsgebruik en snelste route bepalen. Omdat er bij deze testen geen andere Quality of Service eisen zijn dan dat het verkeer wordt afgeleverd, voldoet automatisch al het getransporteerde verkeer aan de QoS eisen. In deze testsituatie komt er uit het effectiviteitcriterium QoS dus altijd 100%. Hiermee heb ik voldoende gegevens om de totale effectieve benutting in de situatie zonder MPLS Traffic Engineering te bepalen. Deze kan ik vergelijken met de theoretische totale effectieve benutting. Met deze vergelijking kan ik aantonen of de praktijk inderdaad overeenkomt met de theorie en heb ik het achterliggende doel bereikt.

Test 1. Bepalen datastromen zonder MPLS Traffic Engineering
Configuratie: Configuraties van de routers in de situatie zonder MPLS Traffic Engineering (H1.2)
Doel van de test: Aantonen hoeveel data in bits/sec. er van en naar routers R1 t/m R5 gaat.

Uit te voeren handelingen:
`Pagent(TGN:OFF<Fa0/0:5/5)#start`
Wacht 25 minuten.
`R1#show interface fastethernet 0/1`
`R1#show interface serial 0/1/0`
`R1#show interface serial 0/1/1`
`R2#show interface serial 0/1/0`
`R2#show interface serial 0/1/1`
`R3#show interface serial 0/1/0`
`R3#show interface serial 0/1/1`
`R4#show interface fastethernet 0/1`
`R4#show interface serial 0/1/0`
`R4#show interface serial 0/1/1`
`R5#show interface serial 0/1/0`
`R5#show interface serial 0/1/1`
`Pagent(TGN:OFF<Fa0/0:5/5)#stop`
Noteer van elke interface de '5 minute input/output rate in bits/sec', bij verwachte uitkomst is aangegeven of van de betreffende interface de input dan wel output rate genoteerd moet worden.

Test 1. Bepalen datastromen zonder MPLS Traffic Engineering

Vervolg Test 1.
Verwachte uitkomst:
`R1#show interface fastethernet 0/1: 5 minute input rate ±4000000 bits/sec`
`R1#show interface serial 0/1/0: 5 minute output rate ±2000000 bits/sec`
`R1#show interface serial 0/1/1: 5 minute output rate ±0 bits/sec`
`R2#show interface serial 0/1/0: 5 minute input rate ±2000000 bits/sec`
`R2#show interface serial 0/1/1: 5 minute output rate ±2000000 bits/sec`
`R3#show interface serial 0/1/0: 5 minute output rate ±0 bits/sec`
`R3#show interface serial 0/1/1: 5 minute input rate ±0 bits/sec`
`R4#show interface fastethernet 0/1: 5 minute output rate ±2000000 bits/sec`
`R4#show interface serial 0/1/0: 5 minute input rate ±0 bits/sec`
`R4#show interface serial 0/1/1: 5 minute input rate ±2000000 bits/sec`
`R5#show interface serial 0/1/0: 5 minute input rate ±0 bits/sec`
`R5#show interface serial 0/1/1: 5 minute output rate ±0 bits/sec`
Toelichting: in de output van het show interface commando wordt, naast een hoop andere gegevens, een 5 minute input rate in bits/sec gegeven en een 5 minute output rate. Hierboven wordt per interface aangegeven of het om de input of output rate gaat. Er staat overal ± voor de bits/sec, reden hiervoor is dat de input en output rate niet heel nauwkeurig zijn.

Gevonden resultaat:
Voldoet het resultaat aan de verwachting?

Voor de situatie met MPLS Traffic Engineering heb ik een vergelijkbare test opgesteld. Uiteraard met een andere configuratie en een andere verwachting. Uit de testresultaten van deze test kan ik de totale effectieve benutting in de situatie met MPLS Traffic Engineering afleiden. De testbeschrijving van test 2 is terug te vinden in de testrapportage.

De derde en laatste test voor het netwerk met Unequal cost load sharing is bedoel om aan te tonen welke route de MPLS Traffic Engineering tunnels gebruiken. Voor deze test wordt gebruik gemaakt van de configuraties in de situatie met MPLS Traffic Engineering. De uit te voeren handeling beperken zich tot één show commando. De verwachte uitkomst geeft de ip adressen van de router interfaces tussen begin en eindpunt. Voor tunnel1 zouden dit de ip adressen van interface S0/1/0 van R2, interface S0/1/1 van R4 en het ip adres van de loopback 0 interface van R4 moeten zijn. Met de resultaten van deze test kan ik aantonen hoe de tunnelroutes in de praktijk lopen, daarmee wordt het testdoel bereikt. Deze kan ik vergelijken met de tunnelroutes uit het theorie voorbeeld (figuur 5). Als de tunnelroutes overeenkomen, heb ik aangetoond dat de theorie en de praktijk hetzelfde zijn en heb ik het achterliggende doel van de testen bereikt.

Test 3. Bepalen route van MPLS Traffic Engineering tunnels
Configuratie: Configuraties van de routers in de situatie met MPLS Traffic Engineering (H1.3)
Doel van de test: Aantonen welke route de MPLS Traffic Engineering tunnels gebruiken
Uit te voeren handelingen: `R1#show mpls traffic-eng tunnels`

Verwachte uitkomst:
`Tunnel1: Explicit Route: 10.0.0.6 10.0.0.14 4.4.4.4`
`Tunnel2: Explicit Route: 10.0.0.10 10.0.0.18 10.0.0.30 4.4.4.4`
Toelichting: in de output van het show mpls traffic-eng tunnels commando wordt, naast een hoop andere gegevens, de explicit route gegeven. Dat zijn de ip adressen van de router interfaces tussen begin en eindpunt. Voor tunnel1 zouden dit de ip adressen van interface S0/1/0 van R2, interface S0/1/1 van R4 en het ip adres van de loopback 0 interface van R4 moeten zijn.

Gevonden resultaat:
Voldoet het resultaat aan de verwachting?

Met de eerste twee testen heb ik de datastromen in de situatie zonder en met MPLS Traffic Engineering bepaald, daarmee heb ik voldaan aan de eisen 11 t/m 14. De derde test toont aan dat de tunnels die conform eis 10 aangebracht moesten worden ook daadwerkelijk de beoogde route volgen. Ik heb hiermee alle punten aangetoond die ik op basis van de eisen aan moest tonen.

8.6 Uitkomsten praktijktesten

Tot nu toe ben ik alleen ingegaan op de testen voor het netwerk met Unequal cost load sharing. Ik heb ervoor gekozen om in dit hoofdstuk in te gaan op alle testen. Reden hiervoor is dat resultaten van belang zijn voor het beantwoorden van de deelvragen. Bovendien geven de testen een goed beeld van de mate waarin ik er in geslaagd ben om aan te tonen of de MPLS Traffic Engineering technieken in de praktijk ook echt werken. Bij de testen beschrijf ik of de resultaten aan de verwachting hebben voldaan. De testresultaten worden per testnetwerk besproken. In de testrapportage (externe bijlage) zijn de complete testbeschrijvingen en testresultaten te vinden.

Testen netwerk met Unequal cost load sharing

De eerste test was erop gericht de datastromen in de situatie zonder MPLS Traffic Engineering inzichtelijk te maken. De verwachting was dat de route R1→R3→R5→R4 niet gebruikt zou worden, waardoor er in totaal slechts 2 Mbps aan data bij R4 aan zou komen. De testresultaten wezen uit dat er op de route R1→R3→R5→R4 geen dataverkeer was. In totaal kwam er ca. 1.97 Mbps aan data bij R4 aan. Dit voldoet aan de verwachting, zeker gezien de bepalingsmethode die gebruikt is. De datahoeveelheden zijn afgeleid middels show interface commando's. De output hiervan is niet heel nauwkeurig.

De tweede test was erop gericht de datastromen in de situatie met MPLS Traffic Engineering inzichtelijk te maken. De verwachting was dat in deze situatie zowel de route R1→R2→R4 als de route R1→R3→R5→R4 gebruikt zouden worden, waardoor er in totaal 4 Mbps aan data bij R4 aan zou komen. De testresultaten wezen uit dat er inderdaad op beide routes dataverkeer was. In totaal kwam er ca. 3.89 Mbps aan data bij R4 aan. Dat voldeed niet helemaal aan de verwachting,

de datastroom via R1→R2→R4 voldeed aan de verwachting, deze week maximaal 2.0% af van de verwachte 2 Mbps. De datastroom via R1→R3→R5→R4 week echter ca. 5% af, dat was meer verwacht. Een gedeeltelijke verklaring voor de afwijking is gevonden via de commando's show interface tunnel1 en show interface tunnel2. Die laten zien dat er 2149000 bits/sec naar tunnel1 worden gestuurd en 1869000 bits/sec naar tunnel2. Tunnel1 loopt via R1→R2→R4 en tunnel2 via R1→R3→R5→R4. Daarmee is de afwijking verklaard. De vraag blijft hoe het komt dat de 4 Mbps niet precies gelijk wordt verdeeld over beide routes. Dit heeft waarschijnlijk te maken met de precieze manier waarop het load sharing plaatsvindt. Mogelijk zou dit voorkomen kunnen worden door de Pagent router twee afzonderlijke datastromen (flows) te laten genereren. Standaard wordt load sharing per flow toegepast, daarbij is elke afzonderlijke combinatie van source en destination ip adres één flow. Deze flows worden verdeeld over 16 verschillende rijen. Bij twee flows zouden beide tunnels dus 8 rijen toebedeeld moeten krijgen waardoor de data precies gelijk wordt verdeeld. Omdat er in het testnetwerk slechts 1 flow was, is gebruik gemaakt van 'per packet load sharing'. Op één flow wordt normaal gesproken geen load sharing toegepast. Reden hiervoor is dat de pakketjes in die flow mogelijk 'uit volgorde' bij de bestemming aankomen omdat de ene route sneller kan zijn dan de andere. De precieze werking van per packet load sharing wordt niet beschreven in de gebruikte literatuur. Aanvullende informatie hierover is wegens tijdgebrek niet meer gezocht.

De derde en laatste test was erop gericht om de route van de tunnels in de situatie met MPLS Traffic Engineering aan te tonen. Belangrijk voor de werking van de technieken is dat de route van de ene tunnel via R1→R2→R4 loopt en dat de route van de andere tunnel via R1→R3→R5→R4 loopt. Het resultaat van de test heeft uitgewezen dat dit inderdaad het geval is.

Ondanks de kleine afwijking bij de tweede test, is de werking van Unequal cost load sharing aangetoond. Als het uitgangspunt is dat er over een 2 Mbps verbinding niet meer data kan dan de 1.97 Mbps die in de test zonder MPLS Traffic Engineering gevonden werd. Dan zou dat betekenen dat 1.97 Mbps gelijk is aan de 50% totale effectieve benutting uit het voorbeeld netwerk. Zonder de genoemde kleine afwijking zou de test met MPLS Traffic Engineering overeenkomen met het voorbeeld. Met de afwijking komt de situatie met MPLS Traffic Engineering op 85.6% (in het voorbeeld 87.5%). Dat is nog steeds slechts 1.9% lager dan het voorbeeld en bovendien nog steeds een veel effectievere benutting dan de situatie zonder MPLS Traffic Engineering (50%).

Testen netwerk DiffServ Traffic Engineering

De eerste test was bedoeld om de delay in de situatie zonder MPLS Traffic Engineering in kaart te brengen. De verwachting was dat alle data via de route R1→R2→R4 zou lopen, waardoor het percentage verkeer met een hoge prioriteit (delay gevoelig verkeer) op die route te hoog zou worden. Door dit hoge percentage zou de delay van de pakketjes te hoog, of in ieder geval hoger, moeten worden dan bij een lager percentage delay gevoelig verkeer op de verbinding. Er zijn resultaten met drie verschillende datastromen. De datastromen van Pagent1 en Pagent2 zijn bij de eerste test constant en samen precies gelijk aan de capaciteit van de route R1→R2→R4 (2 Mbps). Bij de tweede en derde test is de datastroom niet constant. In de tweede test is het moment waarop het pakketje verzonden wordt variabel, de totale datastroom blijft echter wel 1 Mbps.

Verwacht wordt dat de delay hierdoor toeneemt, omdat er nu af toe meer data tegelijk bij R2 aankomt dan de verbinding aan kan. Daardoor moet het data overschot tijdelijk gebufferd worden, wat extra delay oplevert. Bij de derde meting wordt een soortgelijk effect verwacht. De pakketgrootte (lengte) van de datastroom van Pagent2 wordt gevarieerd tussen 40 Bytes en 80 Bytes, wat gemiddeld genomen gelijk is aan de 60 Bytes van de datastroom die bij de eerste meting gebruikt werd. Door de variabele pakketgrootte komt er af en toe meer data bij R2 aan dan de verbinding aan kan. Daardoor moet het data overschot tijdelijk gebufferd worden, wat extra delay oplevert. De delay van het delay gevoelig verkeer van de eerste, tweede en derde datastroom is respectievelijk 5.6 ms, 8.4 ms en 24.4 ms (milliseconde). Daarmee wordt aan de verwachting voldaan.

De tweede test was vrijwel gelijk aan de eerste. Het ging bij de tweede test om de situatie met MPLS Traffic Engineering maar zonder DiffServ Traffic Engineering. Omdat de verwachting was dat ook bij deze situatie al het verkeer via de route R1→R2→R4 zou lopen, werden dezelfde delays verwacht als bij de eerste test. De resultaten van de tweede test komen redelijk overeen met die van de eerste test. De delay van het delay gevoelig verkeer van de eerste, tweede en derde datastroom is respectievelijk 5.5 ms, 7.3 ms en 25.3 ms (milliseconde). De delay van de tweede datastroom is wel 1.1 ms lager dan bij de vorige test. Dat zou kunnen komen doordat de variability (die random is) wat anders uitpakt bij deze test. Daarmee wordt ook bij deze tweede test aan de verwachting voldaan.

De derde test was bedoeld om te bepalen welke route de tunnels in de situatie met MPLS Traffic Engineering maar zonder DiffServ Traffic Engineering kiezen. De verwachting was dat beide tunnels automatisch (op basis van CSPF) de route via R1→R2→R4 zouden kiezen. De testresultaten hebben aangetoond dat dit inderdaad zo is. Er wordt dus aan de verwachting voldaan.

De vierde test had als doel om te bepalen hoe groot de delay in de situatie met DiffServ Traffic Engineering was. De verwachting was dat de delay lager zou zijn dan in de eerste twee situaties. Reden hiervoor is dat de DiffServ Traffic Engineering ervoor zorgt dat het percentage delay gevoelig verkeer op de route R1→R2→R4 niet te hoog wordt. DiffServ Traffic Engineering zorgt er namelijk voor dat het delay gevoelig verkeer van router R7 via de route R1→R3→R5→R4 wordt gestuurd. De testresultaten tonen aan dat de delay van het delay gevoelig verkeer via de route R1→R2→R4 van de eerste, tweede en derde datastroom respectievelijk 4.5 ms, 4.3 ms en 4.3 ms (milliseconde) is. De delay van het delay gevoelig verkeer via de route R1→R3→R5→R4 van de eerste, tweede en derde datastroom is respectievelijk 5.7 ms, 5.9 ms en 5.9 ms (milliseconde). Het verkeer op de langere route loopt, door de omweg, iets meer delay op.

De vijfde test was bedoeld om te bepalen welke route de tunnels in de situatie met DiffServ Traffic Engineering kiezen. De verwachting was dat alle tunnels, behalve de voice tunnel van R7 automatisch (op basis van CSPF) de route via R1→R2→R4 zouden kiezen. De voice tunnel zou de route via R1→R3→R5→R4 kiezen. De testresultaten hebben aangetoond dat dit inderdaad zo is. Er wordt dus aan de verwachting voldaan.

Het belangrijkste doel van DiffServ Traffic Engineering is om mogelijk te maken dat bepaalde verbindingen niet of slechts gedeeltelijk door delay gevoelig verkeer kunnen worden gereserveerd. Dat DiffServ Traffic Engineering werkt wordt aangetoond door de route die de voice tunnel van R7 automatisch kiest. Daarmee is het belangrijkste doel bereikt. Toch zijn de testen niet geheel naar tevredenheid uitgevoerd. In Davie & Farrel (2008, p.126) wordt een voorbeeld beschreven waarbij het effect van de verhoogde delay van het voice verkeer als gevolg van een te hoog percentage voice verkeer op een verbinding ook optreedt als de capaciteit van de verbinding niet maximaal gebruikt wordt. Dat voorbeeld gaat uit van een 2.5 Gbps verbinding waar voice verkeer extra delay op zou lopen zodra er meer dan 1.25 Gbps (ofwel 50%) aan voice verkeer op de verbinding komt, ook in de situatie dat er in totaal slechts 1.75 Gbps (dus nog niet maximaal belast) aan data over de verbinding gaat. In de voor dit onderzoek uitgevoerde testen, kon het delay verhogende effect alleen worden waargenomen rond een maximaal capaciteitsgebruik (2 Mbps in totaal). Achteraf gezien zijn er meerdere oorzaken mogelijk voor het oplopen van de delay van het voice verkeer. Zo zijn de testen uitgevoerd met een priority queue van 1 Mbps, waardoor het teveel aan voice verkeer (in totaal 1.4 Mbps, dus 400 kbps teveel) geen absolute voorrang meer geniet. Van dit verkeer is dus niet te zeggen of de verhoogde delay het gevolg is van de te kleine priority queue of van het te hoge percentage voice verkeer op de verbinding. Ook waren er achteraf gezien meer meting benodigd om de delay bij verschillend capaciteitsgebruik (10%, 20%, 30% enz.) vast te stellen. Hierdoor was het misschien mogelijk geweest om nauwkeurig vast te stellen of er inderdaad geen toename van de delay was bij bijv. 60% capaciteitsgebruik. In Davie & Farrel (2008) wordt niet benoemd hoe groot de toename ongeveer zou moeten zijn, misschien lag de toename wel in de orde van 1 ms. Laatste mogelijke oorzaak is het verschil in gebruikte apparatuur. MPLS Traffic Engineering technieken zijn vooral bedoeld voor ISP netwerken, daarin worden voornamelijk verbindingen van 1 Gbps of meer gebruikt. Voor dit onderzoek waren helaas alleen metingen aan routers met een verbinding van enkele Mbps beschikbaar. Bij een 2 Mbps verbinding spelen vele delay verhogende factoren een rol die bij Gigabit verbindingen geen rol meer spelen. Zo is bijvoorbeeld de transmission delay (dat is de tijd die het kost om een pakketje op de verbinding te plaatsen) bij een 2 Mbps ongeveer 1 à 2 ms, op een Gigabit verbinding ligt deze delay waarschijnlijk en factor 100 of 1000 lager. Dit soort effecten maken het lastiger om een zuivere delay verhoging van voice verkeer te meten. Helaas was er niet genoeg tijd om nader onderzoek naar deze punten te doen.

Testen netwerk Recovery en Protection

Het doel van de eerste test was om te bepalen hoe lang de beschikbare capaciteit niet gebruikt werd na uitval van de verbinding tussen R2 en R4 of de uitval van router R2 in de situatie zonder MPLS Traffic Engineering. De verwachting was dat de beschikbare capaciteit enkele seconden (ergens tussen 1 en 10 s) niet gebruikt zou worden. Testen wezen uit dat de beschikbare capaciteit ca. 7.5 seconden niet gebruikt wordt, zowel bij uitval van de verbinding tussen R2 en R4 als bij uitval van de router R2. Hoewel dit binnen de marge van de verwachting ligt, is de tijd toch aan de hoge kant. In Osborne & Simha (2002, p.292) wordt aangegeven dat het in grote netwerken zo'n 5 à 10 seconden kan duren voordat OSPF geconvergeerd is. Het testnetwerk van vier router kan toch moeilijk als groot netwerk omschreven worden in vergelijking met een ISP netwerk. Vermoedelijk wordt dit enerzijds veroorzaakt doordat router R1 zeer druk is, deze krijgt

200 pakketjes per seconde toegezonden van de Pagent router. ISP routers beschikken waarschijnlijk over betere processoren om het SPF algoritme te berekenen. En anderzijds door de OSPF hello timers die standaard gebruikt worden. Terugkijkend in de testresultaten blijkt het ca. drie seconde te duren voordat R1 'neighbor' R2 'dood' verklaart. OSPF verzendt standaard elke seconde een 'hello packet' naar alle buren (neighbors) om te kijken of de neighbor nog bereikbaar is. Na drie gemiste hello packets wordt de neighbor dood verklaard en het SPF algoritme opnieuw gestart. Deze twee aspecten zouden de oorzaak kunnen zijn van de 7.5 seconden uitval. Extra testen met een lagere hello timer zouden waarschijnlijk voor een kortere uitval dan 7.5 seconden zorgen.

De tweede test was bedoeld om aan te tonen hoe lang de beschikbare capaciteit niet gebruikt wordt na uitval van de verbinding tussen R2 en R4 of de uitval van router R2 in de situatie met MPLS Traffic Engineering. De verwachting was dat de beschikbare capaciteit ca. 50 ms niet gebruikt zou worden. Testen wezen uit dat de capaciteit 170 tot 200 ms niet gebruikt werd zowel bij uitval van de verbinding tussen R2 en R4 als bij uitval van de router R2. Dat is een factor 3 à 4 hoger dan verwacht. De reden hiervoor is vergelijkbaar met de reden bij test 1. Osborne & Simha (2002, p.309) geven aan dat het er bij Fast Reroute allemaal om draait zo snel mogelijk te detecteren dat een verbinding of router uitgevallen is. Interfaces van glasvezelverbindingen (MPLS Traffic Engineering technieken zijn natuurlijk vooral bedoeld voor ISP netwerken die veel gebruik maken van glasvezelverbindingen) hebben een speciaal hiervoor ontwikkelt mechanisme om uitval binnen 50 ms te detecteren. In Osborne & Simha wordt op dezelfde pagina aangegeven dat routers die niet over dit mechanisme beschikken, gebruik kunnen maken van de 'RSVP hello packets'. Dit berust op hetzelfde principe als de OSPF hello packet (zie beschrijving test 1). Voor deze test is gebruik gemaakt van RSVP hello packets die elke 50 ms verzonden worden. Omdat de verbinding, zoals achter bleek, pas na vier gemiste hello packets 'dood' wordt verklaard, duurt het dus 150 tot 200 ms voordat de uitval gedetecteerd wordt. Dat klopt precies met de gevonden 170 tot 200 ms. Jammer genoeg was er geen tijd meer om de testen te herhalen met een hello packets die elke 10 ms verstuurd worden. Daarmee zou met zekerheid vastgesteld kunnen worden of dit inderdaad de oorzaak was van de langere uitval. Ondanks dat dit bewijs ontbreekt, heeft het netwerk in de situatie met MPLS Traffic Engineering in ieder geval veel minder tijd nodig dan het netwerk zonder MPLS Traffic Engineering om een nieuwe route te vinden na uitval van een router of verbinding.

De derde en laatste test was bedoeld om te bewijzen dat de Link en Node protection tunnel inderdaad gebruikt worden bij uitval van de verbinding tussen R2 en R4 of uitval van router R2. De verwachting was dat deze tunnels inderdaad gebruikt zouden worden. De status van de Link en Node Protection tunnel zou na het uitvallen direct (binnen 200ms op basis van test 2) moeten veranderen van ready in active. Ready betekent dat de tunnel standby is en klaar voor gebruik. Active betekent dat de tunnel ook daadwerkelijke als backup route gebruikt wordt. De testen hebben uitgewezen dat de status van zowel de Link als de Node Protection tunnel direct veranderen van ready naar active. Daarmee voldoet de test aan de verwachting.

Samenvattend hebben de testen uitgewezen dat de MPLS Traffic Engineering technieken inderdaad voor een veel sneller herstel van de route zorgen. Waarmee het netwerk met MPLS Traffic Engineering conform de verwachting een veel effectievere benutting heeft dan het netwerk zonder MPLS Traffic Engineering. Op basis van deze testresultaten zou het netwerk met MPLS Traffic Engineering ca. 40 keer zo snel voor een omleiding zorgen, wat overeenkomt met het voorbeeld. Zoals bij test 1 en 2 reeds opgemerkt, zouden beide hersteltijden middels een verbeterde configuratie veel lager moeten uitvallen. De verwachting is dat de hersteltijd in de situatie met MPLS Traffic Engineering verkort kan worden tot 50 ms. In plaats van de gemeten gemiddelde hersteltijd van 187.5 ms zou dat een factor 3.75 sneller zijn. In de situatie zonder MPLS Traffic Engineering is de verwachting dat de hersteltijd verkort kan worden tot 1 à 2 seconden. Dat is een factor 3.75 tot 7.5 sneller. Op basis van deze verwachte hersteltijden zou het netwerk met MPLS Traffic Engineering dus voor een 20 tot 40 keer sneller herstel moeten kunnen zorgen.

8.7 Conclusie Proof of Concept en beantwoording deelvragen

Ik heb uit de testresultaten geconcludeerd dat de verschillende MPLS Traffic Engineering technieken in de praktijk inderdaad voor een effectievere benutting van een MPLS netwerk met standaard routering zorgen. Voor alle drie de toepassingsgebieden werd een duidelijk effectievere benutting van het netwerk met MPLS Traffic Engineering dan zonder MPLS Traffic Engineering gemeten. Daarmee heb ik de belangrijkste deelvraag van het Proof of Concept gedeelte beantwoord (Zorgen deze technieken in de praktijk inderdaad voor een effectievere benutting van het netwerk?). De gevonden resultaten komen in grote lijnen overeen met de theoretische voorbeelden. Er werden weliswaar afwijkingen gevonden, maar deze heb ik kunnen verklaren. Ik heb tevens suggesties voor aanvullende testen gedaan om de afwijkingen weg te nemen. Voor deze aanvullende testen had ik in dit onderzoek helaas geen tijd meer.

De andere twee deelvragen die ik in de Proof of Concept beantwoord heb:

- Hoe zou het effectiever benutten van het netwerk door toepassing van deze technieken in de praktijk getest kunnen worden? Door een netwerk te bouwen dat aan de in hoofdstuk 9.2 (van de onderzoeksrapportage) gestelde eisen voldoet, kan het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering in de praktijk getest worden.
- Welk netwerk is nodig voor zo'n praktijktest? De drie netwerktopologieën en de daarbij behorende configuraties (zie externe bijlage Netwerkconfiguraties) vormen samen de netwerken die nodig zijn voor de praktijktesten.

9. Conclusie en aanbevelingen

Na het beantwoorden van alle deelvragen heb ik in de conclusie van het onderzoeksrapport de hoofdvraag beantwoord. Hieronder heb ik de hoofdvraag voor de volledigheid nogmaals gegeven, de conclusie heb ik letterlijk overgenomen uit het onderzoeksrapport, net als de aanbevelingen aan het eind van dit hoofdstuk. Ik heb bij het opstellen van de conclusie de situaties uit de voorbeeld netwerken gegeneraliseerd, de eerste zin van de conclusie is daar een voorbeeld van. Van de situatie in het voorbeeld netwerk, naar alle situatie waarin verkeer getransporteerd moet worden van A naar B over routes met een ongelijke cost. Door deze generalisaties denk ik dat vrijwel ieder MPLS netwerk met standaard routering effectiever benut kunnen worden. Daarmee heb ik het beoogde domein van dit onderzoek bereikt, namelijk een uitspraak over (nagenoeg) alle MPLS netwerken met standaard routering. Er is natuurlijk altijd wel een theoretisch netwerk te bedenken waarin geen ongelijke routes van A naar B voorkomen, waarin het percentage delay-gevoelig verkeer op de verbindingen niet beperkt hoeft te worden en waarin geen Recovery en Protectioin technieken kunnen worden toegepast. Maar in de praktijk zal een effectievere benutting vrijwel altijd mogelijk zijn.

Hoofdvraag. Hoe kunnen Traffic Engineering technieken worden ingezet voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?
Door het aanbrengen van MPLS Traffic Engineering Load sharing tunnels over verschillende routes van A naar B met een ongelijke cost kan een MPLS netwerk met standaard routering effectiever benut worden. Door het aanbrengen van de tunnels wordt het mogelijk om alle beschikbare capaciteit van A naar B te benutten, terwijl in het netwerk met standaard routering alleen de beschikbare capaciteit van de snelste route (de route die door het routing protocol is verkozen als beste/snelste route) wordt benut. Door de inzet van DiffServ Traffic Engineering tunnels kan een netwerk met standaard routering eveneens effectiever benut worden. Met behulp van DiffServ Traffic Engineering tunnels kan het percentage dataverkeer met een hoge prioriteit (bijv. voice verkeer) op elke verbinding in het netwerk beperkt gehouden worden. Hierdoor kan al het voice verkeer met een lage delay verstuurd worden en blijft de totale delay die het voice verkeer oploopt gegarandeerd laag. In een MPLS netwerk met standaard routering is het niet mogelijk om het percentage voice verkeer te beheersen. Daardoor kan niet gegarandeerd worden dat het voice verkeer op elke verbinding met een lage delay wordt verstuurd, waardoor ook geen lage totale delay gegarandeerd kan worden. De laatste manier waarop een MPLS netwerk met standaard routering effectiever benut kan worden is door de inzet van MPLS Traffic Engineering Recovery en Protection technieken. Daarbij wordt een normale MPLS Traffic Engineering tunnel beschermd door preventief aangebrachte backup tunnels. Deze backup tunnels kunnen het dataverkeer razendsnel (binnen ca. 50 ms) omleiden in het geval dat er een verbinding of een router op de route van de normale tunnel uitvalt. Hierdoor gaat er dus maximaal 50 ms aan data verloren. In een netwerk met standaard routering gaan alle routers na het uitvallen van een verbinding of router eerst informatie uitwisselen. Met deze informatie gaan de routers vervolgens op basis van de nieuwe situatie een nieuwe route naar alle bestemmingen in het netwerk berekenen. Afhankelijk van de grootte van het netwerk (aantal routers en aantal subnetwerken) kost dit 1 tot

10 seconden. Hierdoor gaat er dus 1 tot 10 seconden aan data verloren, wat beduidend meer is dan de 50 ms in de situatie met MPLS Traffic Engineering.

De hierboven beschreven effectieve benutting is in dit onderzoek zowel in theorie als in de praktijk bepaald. Voor een aantal theoretische voorbeeld netwerken is bepaald wat in theorie de totale effectieve benutting van dat netwerk met MPLS Traffic Engineering en zonder MPLS Traffic Engineering (is MPLS netwerk met standaard routering) technieken is. Van drie van deze voorbeeld netwerken is de effectieve benutting met en zonder MPLS Traffic Engineering gemeten. Uit de resultaten van deze praktijktesten is gebleken dat de verschillende MPLS Traffic Engineering technieken in de praktijk inderdaad voor een effectievere benutting van een MPLS netwerk met standaard routering zorgen. Voor alle drie de toepassingsgebieden (Load sharing, DiffServ Traffic Engineering en Recovery & Protecion) werd een duidelijk effectievere benutting van het netwerk met MPLS Traffic Engineering dan zonder MPLS Traffic Engineering gemeten. De gemeten effectieve benuttingen komen in grote lijnen overeen met de theoretische voorbeelden. Er werden weliswaar afwijkingen gevonden, maar deze waren verklaarbaar. Bij de aanbevelingen worden suggesties gedaan voor aanvullende testen waarmee deze afwijkingen weggenomen kunnen worden. Voor deze aanvullende testen was in dit onderzoek helaas geen tijd meer.

Aanbevelingen

Zoals in de conclusie al aangegeven komen de praktijktesten in grote lijnen overeen met de theorie, maar zijn er nog wel een aantal afwijkingen tussen de theorie en de praktijk. Hierna wordt per toepassingsgebied aangegeven welke aanvullende testen uitgevoerd zouden kunnen worden om de afwijkingen weg te nemen.

Load sharing

In de praktijktesten werd een kleine afwijking (ca. 2%) in de effectieve benutting in de situatie met MPLS Traffic Engineering gevonden ten opzichte van de theorie. De afwijking is verklaard door het feit dat de data niet gelijk wordt verdeeld over beide tunnels. De vraag blijft hoe het komt dat de data niet precies gelijk worden verdeeld over beide routes. Dit heeft waarschijnlijk te maken met de precieze manier waarop het load sharing (verdelen van data over de tunnels) plaatsvindt. Mogelijk zou dit voorkomen kunnen worden door de Pagent router twee afzonderlijke datastromen (flows) te laten genereren. Meer informatie over deze aanvullende test is te vinden in hoofdstuk 9.4 (van het onderzoeksrapport), kopje 'Testen netwerk met Unequal cost load sharing' bij de beschrijving van de tweede test.

DiffServ Traffic Engineering

In de praktijktesten werd conform de verwachting in het netwerk zonder MPLS Traffic Engineering een hogere delay gemeten dan in het netwerk met MPLS Traffic Engineering. Uit de praktijktesten was echter niet te bepalen of de oorzaak van deze delay gelijk is aan de oorzaak die in de theorie genoemd wordt. Voor het achterhalen van de oorzaak zijn aanvullende testen nodig. Meer informatie over die aanvullende testen is te vinden in hoofdstuk 9.4 (van het onderzoeksrapport), kopje 'Testen netwerk DiffServ Traffic Engineering', in de laatste alinea.

Recovery en Protection

Bij de praktijktesten werd aangetoond dat de hersteltijd na het uitvallen van een verbinding of router in het netwerk zonder MPLS Traffic Engineering ongeveer 40 maal zo hoog was als in het netwerk met MPLS Traffic Engineering. De hersteltijd lag in beide situaties echter grofweg een factor 4 hoger dan verwacht. Bij de beschrijving van de eerste en tweede test in hoofdstuk 9.4 (van het onderzoeksrapport), kopje 'Testen netwerk Recovery en Protection' is aangegeven welke aanvullende testen kunnen worden uitgevoerd om de hersteltijd te verkorten naar de verwachte hersteltijd.

10. Procesevaluatie

Ik ben in het algemeen zeer tevreden over het verloop van het onderzoek. De keuze voor de gebruikte methodiek van Oost (2002) is zeer goed bevallen. De methodiek geeft aan dat ca. 30% van de totale onderzoekstijd aan de voorbereiding moet worden besteed. Een groot deel van mijn voorbereidingstijd is gaan zitten in het opstellen van het afstudeerplan. Dat was echter voordat het afstuderen echt begon. Hierdoor kan ik niet goed inschatten hoeveel tijd ik precies aan de voorbereiding heb besteed. Wat ik echter wel weet, is dat ieder minuut die er in de voorbereiding is gaan zitten het dubbel en dwars waard was. Door alle tijd en aandacht die ik heb besteed aan het opstellen van een goede probleemstelling en een goed onderzoekplan, ging ik bij het onderzoek effectief en efficiënt te werk.

Ik denk dat het gebruik van de methode de kwaliteit van mijn onderzoek heeft verhoogd. Ook voor tijdens de uitvoeren geeft de methode concrete handvatten voor het borgen van de kwaliteit. Eén punt waar ik de methode en ook het onderzoekplan niet geheel gevolgd heb, is met het bijhouden van een logboek. In het onderzoeksplan had ik aangegeven dat ik een logboek bij zou houden. Tijdens het literatuuronderzoek heb ik dat ook gedaan. Dat is te zien aan de gedetailleerde beschrijving van alle zoekacties in de externe bijlage Selectie literatuur. Nadat de literatuurselectie was beëindigd ben ik afgestapt van het bijhouden van een logboek. In plaats daarvan heb ik een Stand van zaken document bijgehouden (externe bijlage Stand van Zaken). Ik vond het logboek zeer geschikt voor de literatuurselectie omdat het logboek de controleerbaarheid en de herhaalbaarheid vergroot. Voor de andere delen van het onderzoek vond ik een logboek echter te gedetailleerd. Daarom ben ik overgestapt naar het beknopte Stand van zaken document. Daarin heb ik kort aangegeven wat ik deze week gedaan heb, wat ik volgende week ga doen, of ik nog op schema zit en of ik ergens ben afgeweken van het onderzoeksplan. Mijn afstudeerdossier bevat dus een document Selectie literatuur en een document Stand van Zaken, maar geen logboek.

Het selecteren van literatuur is snel en goed verlopen. Ik ben achteraf blij met de keuze van de geselecteerde boeken. Ik heb duidelijk het meeste gehad aan het boek van Osborne & Simha (2002). Dit bevatte verreweg de meeste informatie over MPLS Traffic Engineering. Voor de praktijktesten was het erg prettig dat het boek veel configuratievoorbeelden met Cisco commando's gaf.

Het analyseren is eveneens conform plan verlopen. De methode om de theorie in Osborne & Simha (2002) grondig te bestuderen en deze te vergelijken met de andere twee boeken heeft goed gewerkt.

Het Proof of Concept gedeelte van dit onderzoek had ik vooraf ingeschat als het meest risicovolle deel van dit onderzoek. Dat klopte zeker al traden er toch nog andere problemen op dan voorzien. Zo was er zoals eerder aangegeven nauwelijks informatie over de Pagent routers te vinden. Dat probleem werd gelukkig opgelost met de Pagent handleiding die ik van Richard Arends heb gekregen. Daarnaast was er een probleem met het Cisco IOS op de routers. Ik had bij de

inventarisatie van het Ciscolab de versie van het IOS genoteerd. Deze had ik vergeleken met de IOS versie die ik in de literatuur vond. Desondanks bleek de versie niet te werken, het Cisco IOS versienummer systeem bleek zo ingewikkeld dat er zelfs een wikipedia artikel over is. Uiteindelijk heb ik na lang zoeken toch een nieuw IOS gevonden, waarna ik de testen weer kon vervolgen.

Ik vond het erg jammer dat ik niet nog een week extra voor enkele aanvullende testen had. Ik ben ervan overtuigd dat ik daarmee nog betere resultaten zou bereiken. Ondanks dat ben ik zeer tevreden met de behaalde resultaten. Deze tonen de effectievere benutting duidelijk aan en de afwijkingen ten opzichte van de theoretische voorbeelden zijn goed te verklaren.

11. Productevaluatie

De bij dit onderzoek opgeleverde (tussen)producten zijn:

- onderzoeksplan;
- document selectie literatuur;
- netwerkconfiguraties en topologieën;
- testrapportage;
- onderzoeksrapport.

Over het onderzoeksplan ben ik zeer tevreden. Zoals ik bij de procesevaluatie al aangaf, waren er weinig afwijkingen van het onderzoeksplan. Het bleek goed in elkaar te zitten, waarschijnlijk komt dit vooral door de vele uren die er dankzij de gebruikte methodiek in geïnvesteerd zijn.

Het literatuurselectie document is vooral bedoeld om het onderzoek controleerbaar en herhaalbaar te maken. Zowel voor mijzelf als voor de lezers van het onderzoeksrapport. Ik denk dat de informatie voldoende gedetailleerd is om de literatuurselectie te herhalen. Het document voldoet dan ook aan mijn verwachtingen.

Ik ben tevreden met de ontworpen netwerken en de opgestelde configuraties. Met deze netwerken bleek ik goed in staat om aan te tonen dat een MPLS netwerk met standaard routering effectiever benut kan worden door de inzet van MPLS Traffic Engineering technieken.

Het doel van de testen in de testrapportage was om de beweringen uit de theoretische voorbeeldnetwerken te controleren op juistheid. Daar ben ik grotendeels in geslaagd. Zoals bij de procesevaluatie genoemd waren er wel wat afwijkingen, maar deze hebben niets te maken met de kwaliteit van de opgestelde testen. De eerdere genoemde aanvullende testen zijn voornamelijk testen met een verbeterde configuratie. De beschrijvingen in de testrapportage zouden voldoende gedetailleerd moeten zijn om de testen zonder aanvullende instructies uit te kunnen voeren. Terugkijkend denk ik dat het een geslaagd testplan was (de testrapportage is het ingevulde testplan).

Het laatste opgeleverde product in het onderzoeksrapport. Het rapport is bedoeld om een goed beeld te geven van de mogelijkheden die MPLS Traffic Engineering technieken bieden voor een effectievere benutting van een netwerk met standaard routering. Ik heb met de gekozen opbouw geprobeerd om steeds verder in te zoomen om de MPLS Traffic Engineering technieken. Ik heb een aantal uitgebreide voorbeelden gegeven en de goed gedocumenteerde praktijktesten bijgevoegd. Ik denk dat ik er daarmee goed in geslaagd ben om de mogelijkheden ten aanzien van de effectievere benutting in kaart te brengen. Ik ben dan ook erg tevreden met het eindresultaat.

12. Literatuur

1) Oost, H., Markenhof, A., *Een onderzoek voorbereiden*, (2002, eerste druk, tiende oplage 2008), Baarn: HBuitgevers;
2) Oost, H., *Een onderzoek uitvoeren*, (2002, eerste druk, zevende oplage 2008), Baarn: HBuitgevers.
3) Verhoeven, N. *Wat is onderzoek? (*2007, tweede herziene druk, derde oplage 2008), Boom Onderwijs.
4) Osborne, E., Simha, A., *Traffic Engineering with MPLS*, (2002, eerste druk), Indianapolis USA: Cisco Press;
5) Davie, B., Farrel, A., *MPLS: Next Steps*, (2008, eerste druk), Burlington USA: Morgan Kaufmann Publishers (Elsevier);
6) Minei, I., Lucek, J., *MPLS-Enabled Applications*, (2005, eerste druk), Chichester England: John Wiley & Sons Ltd;

BIJLAGE 1

Lijst van gebruikte afkortingen

Afkortingen

ATM	Asynchronous Transfer Mode
bps	bits per seconde
CBWFQ	Class Based Weighted Fair Queuing
CEF	Cisco Express Forwarding
CER	Customer Edge Router
CSPF	Constrained Shortest Path First
DiffServ	Differentiated Services
DSCP	Differentiated Services Code Point
DS-TE	DiffServ Traffic Engineering
EIGRP	Enhanced Iterior Gateway Routing Protocol
FIB	Forwarding Information Base
FRR	Fast Reroute
Gbps	Gigabits per seconde
HHS	Haagse Hogeschool
IOS	Internetwork Operation System
ip	internet protocol
IS-IS	Intermediate System to Intermediate System
ISP	Internet Service Provider
kbps	kilobits per seconde
LDP	Label Distribution Protocol
LER	Label Edge Router
LFIB	Label Forwarding Information Base
LIB	Label Information Base
LLQ	Low Latency Queuing
LSR	Label Switch Router
MAM	Maximum Allocation Model
Mbps	Megabits per seconde
MPLS	Multi Protocol Label Switching
ms	milli seconde
OSI	Open Systems Interconnection
OSPF	Open Shortest Path First
PPP	Point to Point Protocol
QoS	Quality of Service
RDM	Russian Dolls Model
RIP	Routing Information Protocol
RSVP	Resource Reservation Protocol
SLA	Service Level Agreement
SPF	Shortest Path First
TDP	Tag Distribution Protocol
TE	Traffic Engineering
WRED	Weighted Random Early Detection

BIJLAGE 2

Wijze van aantonen competentieset

Competenties

In het afstudeerplan heb ik aangegeven dat ik tijdens het onderzoek zou demonstreren dat ik over onderstaande drie competenties beschik en dat ik daarbij aan niveau 3 of 4 zou voldoen. Hieronder licht ik toe uit welke documenten of delen van dit onderzoek blijkt dat ik de competenties heb toegepast en dat ik het beoogde niveau heb gehaald. Het beoogde niveau is per competentie vermeld.

A1. Analyseren van het probleemdomein

Niveau 4 (op basis van zelfstandige uitvoering en complex context)

Deze competentie heb ik tijdens een groot deel van het onderzoek toegepast. Ik heb het volledige onderzoek zelfstandig opgezet en uitgevoerd. Voor mij begon de analyse van het probleemdomein dus al voor de echte aanvang van het afstuderen. Tijdens het afstuderen heb ik de competentie toepast bij het onderzoeksplan, de literstudie en bij het beschrijven van de mogelijkheden van de MPLS Traffic Engineering technieken. De competentie is terug te vinden in het onderzoeksplan, het onderzoeksrapport (vrijwel geheel, behalve het Proof of Concept gedeelte) en dit procesverslag (vrijwel geheel, hoofdstuk 5 en 8 uitgezonderd). Ik denk dat ik hiermee voldaan heb aan het demonstreren van de competentie en aan het niveau van de competentie.

C9. Ontwerpen van een infrastructuur

Niveau 3 (op basis van zelfstandige uitvoering en lastige context)

Deze competentie heb ik toegepast bij het opstellen van de netwerkontwerp van het Proof of Concept. Ik heb de ontwerpen volledig zelfstandig opgesteld. Bij de drie netwerkontwerpen heb ik de volledige configuratie van alle routers opgesteld. Ook heb ik me verdiept in de werking van de Pagent routers. Met deze routers heb ik een aantal testen uitgevoerd teneinde de juiste configuratie van deze apparatuur voor mijn testopstelling te verkrijgen. De competentie is toegepast bij het document Netwerkconfiguraties en topologieën, het onderzoeksrapport (hoofdstuk 9.3) en in dit procesverslag (hoofdstuk 8.3 en 8.4). Ik denk dat ik hiermee voldaan heb aan het demonstreren van de competentie en aan het niveau van de competentie.

D18. Testen van een infrastructuur

Niveau 3 (op basis van zelfstandige uitvoering en lastige context)

Deze competentie heb ik toegepast bij het opstellen van het testrapport van het Proof of Concept. Ik heb volledig zelfstandig alle testen bedacht, alle drie de testopstellingen gebouwd en alle testen uitgevoerd. Vervolgens heb ik de resultaten geanalyseerd en indien nodig de testen aangepast en herhaald. Ten slotte heb ik de testen gerapporteerd. Zoals bij competentie C9 genoemd, heb ik ook nog een aantal testen met de Pagent routers uitgevoerd. Deze testen hadden als doel de Pagent routers optimaal in te kunnen zetten voor de drie testopstellingen. De competentie is toegepast bij het testrapport (dat een ingevulde versie van het testplan is), het onderzoeksrapport (hoofdstuk 9.4) en in dit procesverslag (hoofdstuk 8.5 en 8.6). Ik denk dat ik hiermee voldaan heb aan het demonstreren van de competentie en aan het niveau van de competentie.

Afstudeerplan

Informatie afstudeerder en gastbedrijf (*structuur niet wijzigen*)

Afstudeerblok: 2009-2.2
Startdatum: 16 november 2009
*Einddatum:*29 maart 2010
Inleverdatum: uiterlijk 29 maart 2010

Studentnummer: 00004401
Achternaam: dhr. van de Grint (*) weghalen niet van toepassing
Voorletters: S
Roepnaam: Sebastiaan
Adres: Conradkade 64 B
Postcode: 2517 BS
Woonplaats: Den Haag
Telefoon: 06-50698024 *Mobiel*: 06-50698024

Opleiding: Technische Informatica
Locatie: Den Haag
Variant: deeltijd

Naam studieloopbaanbegeleider: Hans van der Burg
Naam begeleider/examinator: Bart Jan Koning
Naam expert/examinator: Hans Witkamp

Naam bedrijf: DGMR Raadgevende Ingenieurs B.V.
Afdeling bedrijf: DGMR Software en IT
Bezoekadres bedrijf: Eisenhowerlaan 112
Postcode bezoekadres: 2517 KM
Postbusnummer: 82223
Postcode postbusnummer: 2508 EE
Plaats: Den Haag
Telefoon bedrijf: 070-3503999
Telefax bedrijf: 070-3584752
Internetsite bedrijf: www.dgmr.nl

Achternaam opdrachtgever: dhr Schmidt (*) weghalen niet van toepassing
Voorletters opdrachtgever: R.G.
Titulatuur opdrachtgever: Ing.
Functie opdrachtgever: Senior Sectormanager
Doorkiesnummer opdrachtgever: 070-3380214
Email opdrachtgever: SD@dgmr.nl

Achternaam bedrijfsmentor: dhr Schmidt (*) weghalen niet van toepassing
Voorletters bedrijfsmentor: R.G.
Titulatuur bedrijfsmentor: Ing.
Functie bedrijfsmentor: Senior Sectormanager
Doorkiesnummer bedrijfsmentor: 070-3380214
Email bedrijfsmentor: SD@dgmr.nl

Doorkiesnummer afstudeerder: 070-3380228
Bedrijfsemail afstudeerder: GT@dgmr.nl
Functie afstudeerder (deeltijd/duaal): Senior Technisch Specialist Software

Opdrachtomschrijving

Titel afstudeeropdracht:
Hoe kunnen Traffic Engineering technieken worden ingezet voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?

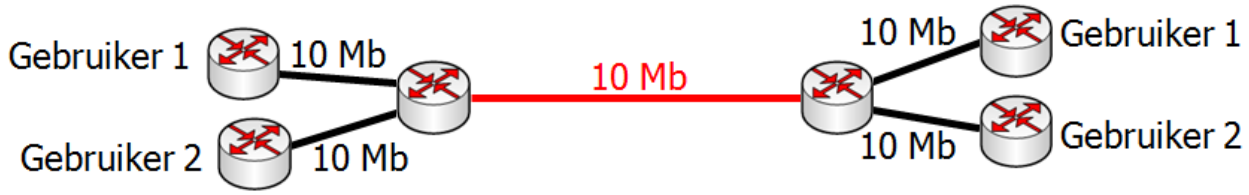
1. Bedrijf

Het bedrijf DGMR Raadgevende Ingenieurs B.V. is een adviesbureau. DGMR is actief op het gebied van bouwfysica, brandveiligheid, industrie, verkeer, milieu en software. Het is een middelgroot bedrijf verdeeld over vijf vestigingen met in totaal ca. 180 medewerkers. Het bedrijf heeft een holding structuur, waarvan de DGMR Raadgevende Ingenieurs B.V. de Holding is. Hieronder hangen zes verschillende B.V.'s. De tien sectoren waarop DGMR actief is, zijn verdeeld over de zes B.V.'s. De opdracht zal worden uitgevoerd bij de sector Software en IT, welke onder DGMR Software B.V. valt.

De sector Software en IT is opgedeeld in de twee subsectoren 'Maatwerk software en IT-diensten' en 'Standaard software'. De standaard producten worden ontwikkeld op basis van markt verwachtingen en vraag. De software wordt meerdere malen afgenomen door verschillende opdrachtgevers. Maatwerk producten worden ontwikkeld op basis van het eisenpakket van een (interne of externe) opdrachtgever (of consortium) welke eenmalig of gedurende een langere periode worden afgenomen. Deze software gaat alleen in productie bij de opdrachtgever of opdrachtgever heeft (exclusief) recht om het product te verspreiden aan derden (als zijnde een standaard product).

2. Aanleiding

Bij heel veel grote datanetwerken, zoals bijvoorbeeld een groot aantal Internet Service Provider (ISP) netwerken, zijn gedeeld. Met gedeeld wordt bedoeld dat de capaciteit van het netwerk door verschillende gebruikers gedeeld wordt. Gedeelde netwerken zijn vrijwel altijd overboekt, wat inhoudt dat er meer verkeer naar het netwerk kan, dan er over het netwerk getransporteerd kan worden. Stel dat een netwerkverbinding van 10 Mbit gedeeld wordt door 2 gebruikers dan heet dat een 1:2 overboeking, figuur 1 laat dit zien. Beide gebruikers hebben een 10 Mbit verbinding (zwarte lijnen) naar de netwerkverbinding (rode lijn). Als gebruiker 2 de verbinding niet gebruikt, heeft gebruiker 1 de volledige 10 Mbit ter beschikking. Bij gelijktijdig gebruiker krijgen beide gebruikers 5 Mbit. Voordeel van het overboeken is dat beide gebruikers de kosten voor de verbinding delen en dus als het ware betalen voor een 5 Mb verbinding, terwijl zij gedurende een gedeelte van de tijd 10 Mb ter beschikking hebben.



Figuur 1. 10 Mb netwerkverbinding die door 2 gebruikers gedeeld wordt (1:2 overboeking).

Het voorbeeld is voor één netwerkverbinding met twee gebruikers, maar hetzelfde principe wordt toegepast op grote netwerken met vele gebruikers. Door de overboeking is het onvermijdelijk dat er op een gegeven moment congestion (opstopping) op bepaalde verbindingen ontstaat. Zodra gebruiker 1 en 2 beide 10 Mbit naar de verbinding sturen komt er 20 Mbit aan terwijl er maar 10 Mbit over de verbinding kan. In dat geval is er dus sprake van congestion.

In het geval van congestion spelen twee verzamelingen van technieken een belangrijke rol, te weten Quality of Service (QoS) en Traffic Engineering (TE). QoS zorgt ervoor dat belangrijker verkeer voorrang krijgt tijdens congestion. QoS regelt alleen de prioritering van het dataverkeer op één verbinding, namelijk de verbinding waar op dat moment congestion optreedt. QoS regelt het dataverkeer dus alleen lokaal. Traffic

Engineering zorgt voor het omleiden van dataverkeer tijdens congestion en een betere verdeling van het dataverkeer over alle beschikbare verbindingen. Traffic Engineering is dus een verzameling technieken die bedoeld zijn om het verkeer op het gehele netwerk te regelen. Hoewel QoS en Traffic Engineering dus beiden van toepassing zijn bij congestion, zijn het twee compleet verschillende takken van sport. Beiden kunnen zowel los als naast elkaar worden toegepast.

Mede omdat MPLS (Multiprotocol Label Switching) een goede implementatie van QoS en Traffic Engineering mogelijk maakt, is de populariteit van MPLS netwerken enorm toegenomen. Vrijwel alle grote ISP's hebben een MPLS netwerk, een voorbeeld is het KPN Epacity netwerk (MPLS- VPN).

MPLS als label-switching techniek en MPLS-VPN als netwerk met (Virtual Private Network) VPN service zijn de enige MPLS onderdelen die behandeld zijn tijdens de CCNP colleges op de Haagse Hogeschool (HHS). MPLS QoS is aan bod gekomen bij onderzoeken die door de afstudeerder uitgevoerd zijn tijdens de blokken TI5 en TI7 aan de HHS.

3. Probleemstelling

Omdat de afstudeerder geen kennis van en ervaring met MPLS Traffic Engineering heeft, dient de volgende vraag gesteld te worden: hoe kunnen Traffic Engineering technieken worden ingezet voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?
Om tot een antwoord op deze vraag te komen, zullen de onderstaande deelvragen beantwoord moeten worden:

1. Wat is een MPLS netwerk?
2. Wat is Traffic Engineering?
3. Welke MPLS Traffic Engineering technieken zijn er?
4. Welke mogelijkheden bieden de MPLS Traffic Engineering technieken?
5. Welke criteria bepalen de effectiviteit van de benutting van een (MPLS) netwerk?
6. Hoe effectief wordt een MPLS netwerk zonder Traffic Engineering technieken benut?
7. Hoe zouden de gevonden Traffic Engineering technieken bij kunnen dragen aan het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?
8. Hoe zou het effectiever benutten van het netwerk door toepassing van deze technieken in de praktijk getest kunnen worden?
9. Welk netwerk is nodig voor zo'n praktijktest?
10. Zorgen deze technieken in de praktijk inderdaad voor een effectievere benutting van het netwerk?

4. Doelstelling van de afstudeeropdracht

De eerste vraag heeft als doel de lezer inzicht te geven in de globale werking van een netwerk waarbij MPLS wordt toegepast om datapakketjes te switchen. De tweede vraag geeft zowel de lezer als de afstudeerder inzicht in het begrip Traffic Engineering in het algemeen, wat behoort wel en wat behoort niet tot Traffic Engineering. Het doel van de derde vraag is om vast te stellen welke MPLS Traffic Engineering technieken er zijn. Vraag 4 heeft als doel de lezer en de afstudeerder kennis te verschaffen over de mogelijkheden van de MPLS Traffic Engineering technieken. De vijfde vraag geeft de lezer en afstudeerder inzicht in de factoren die de effectieve benutting van een MPLS netwerk bepalen. Vraag 6 heeft als doel voor de lezer en de afstudeerder om de referentiesituatie met standaard routering helder te maken. Het doel van vraag 7 is om de lezer en afstudeerder inzicht te geven in de manier waarop deze technieken bij zouden kunnen dragen aan een effectievere benutting van het netwerk. Vraag 8 heeft als doel voor de lezer en de afstudeerder in kaart te brengen op welke manier in de praktijk getest kan worden of deze technieken het netwerk inderdaad effectiever benutten dan een netwerk zonder deze technieken. De afstudeerder doet daarnaast ook ervaring op in het bepalen en het vastleggen van de eisen aan een testnetwerk. De negende vraag is enerzijds bedoeld om de afstudeerder ervaring op te laten doen met het vertalen van de eisen aan het testnetwerk in een netwerkontwerp waarin MPLS Traffic Engineering technieken worden toegepast. En anderzijds om ervaring op te doen met het daadwerkelijk bouwen van het ontworpen netwerk en het toepassen van de geleerde technieken. Doel van vraag 10 is voor de afstudeerder het opdoen van ervaring in het analyseren van testresultaten en het verbinden van conclusies aan deze testresultaten. Daarnaast

geeft deze vraag de lezer en de afstudeerder inzicht in de werking van de technieken in de praktijk ten aanzien van het effectiever benutten van het netwerk.

De hoofdvraag geeft de lezer en de afstudeerder kennis van en inzicht in de manier waarop MPLS Traffic Engineering technieken kunnen worden ingezet voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk. De afstudeerder doet naast kennis en inzicht ook nog praktijkervaring op in het toepassen van de technieken.

5. Resultaat

Het belangrijkste resultaat is een onderzoeksrapport. In het rapport zal worden uitgelegd wat MPLS netwerken zijn en wat Traffic Engineering is. In het rapport zal tevens beschreven worden welke specifieke MPLS Traffic Engineering technieken er zijn en wat de mogelijkheden van deze technieken zijn. Daarna wordt vastgelegd welke criteria bepalen hoe effectief een MPLS netwerk benut wordt. Vervolgens wordt in het rapport ingegaan op de mate waarin een MPLS netwerk effectief benut wordt in de referentiesituatie met standaard routering. Uiteraard zal in het rapport ook worden ingegaan op de manier waarop deze technieken zouden kunnen bijdragen aan het effectiever benutten van een MPLS netwerk. Er zal worden beschreven hoe de effectiviteit van deze technieken in de praktijk getest zou kunnen worden. De ontwerpen van de testnetwerken zullen ook worden opgenomen in de rapportage. De configuratiefiles van de daadwerkelijk gebouwde netwerken en het testplan met een beschrijving van de (resultaten van de) praktijktesten zullen als bijlage worden toegevoegd aan de rapportage. Naast het onderzoeksrapport wordt een afstudeerverslag met daarin de procesbeschrijving van het gehele afstudeertraject opgeleverd.

6. Uitgangssituatie aan de hand van:

a. Beschikbare noodzakelijke software (*indien van toepassing*)

- Dynamips en/of gn3 voor het emuleren van een of meerdere netwerken ten behoeve van een 'proof of concept'.

b. Beschikbare noodzakelijke hardware (*indien van toepassing*)

De routers in het laboratorium van de HHS voor het bouwen van een of meerdere netwerken ten behoeve van een 'proof of concept.'

c. Reeds opgeleverde relevante documenten:

Geen.

d. Aanwezige ideeën:

De netwerken die gebouwd of geëmuleerd zullen worden ten behoeve van een 'proof of concept' van de Traffic Engineering technieken zullen met Cisco apparatuur worden gemaakt. Het laboratorium van de HHS bestaat enkel uit Cisco apparatuur. In Dynamips en GN3 kunnen ook alleen Cisco routers worden geëmuleerd.

7. Werkzaamheden aan de hand van:

a. Te hanteren methodieken:

Het onderzoek zal worden voorbereid en uitgevoerd conform de methodieken beschreven in onderstaande boeken. Voor dit onderzoek zullen met name de stukken die betrekking hebben op het onderzoekstype 'ontwerponderzoek' worden gebruikt.

- Oost, H., Markenhof, A., *Een onderzoek voorbereiden*, (2002, eerste druk, tiende oplage 2008), Baarn: HBuitgevers;
- Oost, H., *Een onderzoek uitvoeren*, (2002, eerste druk, zevende oplage 2008), Baarn: HBuitgevers.

b. Uit te voeren activiteiten:

1. bepalen zoekstrategie;
2. opstellen onderzoeksplan;
3. opleveren onderzoeksplan;
4. bijhouden logboek;
5. opleveren logboek;
6. literatuur verzamelen;
7. literatuur bestuderen;
8. beschrijven globale werking MPLS netwerk in onderzoeksrapportage;
9. beschrijven van het begrip Traffic Engineering in onderzoeksrapportage;
10. beschrijven welke MPLS Traffic Engineering technieken er gevonden zijn in onderzoeksrapportage;
11. beschrijven mogelijkheden gevonden MPLS Traffic Engineering technieken in onderzoeksrapportage;
12. beschrijven criteria effectieve benutting van een MPLS netwerk;
13. beschrijven mogelijke bijdrage gevonden technieken aan het effectiever benutten van MPLS netwerk; in onderzoeksrapportage
14. bepalen eisen netwerk(en) praktijktesten;
15. vastleggen eisen netwerk(en) praktijktesten in onderzoeksrapportage;
16. ontwerpen netwerk(en) praktijktesten;
17. ontwerpen netwerk(en) praktijktesten vastleggen in onderzoeksrapportage;
18. bouwen netwerk(en) praktijktesten;
19. opleveren configuratiefiles;
20. opstellen testplan;
21. uitvoeren praktijktesten met en zonder Traffic Engineering technieken;
22. uitkomsten praktijktesten vastleggen in testrapportage;
23. opleveren testrapportage;
24. opstellen onderzoeksrapport;
25. opleveren onderzoeksrapport;
26. opstellen afstudeerverslag
27. opleveren afstudeerverslag.

c. Te gebruiken technieken:

Geen.

d. Te vermelden nadrukken:

Geen.

8. Risico's en maatregelen

Nr.	Omschrijving	Kans	Impact
1	Bouwen testnetwerk niet mogelijk	Klein	Groot
2	Proof of concept lukt niet voor alle Traffic Engineering technieken	Middel	Middel

Bouwen testnetwerk niet mogelijk

Uitleg risico: MPLS TE wordt veelal toegepast in grote (ISP) netwerken, het is erg lastig om in te schatten hoe groot het netwerk moet zijn voor een proof of concept. Voor het bouwen van een testnetwerk zal het waarschijnlijk noodzakelijk zijn om de te emuleren routers (met behulp van GN3 of Dynamips) over meerdere PC's te verdelen, omdat op één PC slechts ca. 6 routers geëmuleerd kunnen worden. Een kort onderzoekje op internet leert dat dit mogelijk moet zijn.

Kans: klein, de kans wordt klein geschat omdat het korte onderzoek op internet heeft uitgewezen dat het mogelijk moet zijn.

Impact: groot, het bouwen van het testnetwerk is zeer belangrijk voor het toetsen van de werking van de MPLS Traffic Engineering technieken en voor de ontwerp en test competenties. De impact van dit risico wordt daarom als groot ingeschat.

Maatregelen: Mocht het emuleren over meerdere PC's om wat voor reden dan ook niet lukken, zal gebruik gemaakt worden van het laboratorium van de Haagse Hogeschool voor de 'proof of concept'.

Proof of concept lukt niet voor alle Traffic Engineering technieken

Uitleg risico: op dit moment is het erg moeilijk om in te schatten hoeveel tijd het toetsen van de werking van de MPLS Traffic Engineering technieken gaat kosten. Het is nog onduidelijk op welke manier de effectiviteit gemonitord dient te worden. Er is onbekend hoeveel technieken getest dienen te worden. Tevens is de grootte van het benodigde testnetwerk onbekend. En het is onbekend of de testen allemaal op één testnetwerk uitgevoerd kunnen worden.

Kans: middel, gezien de vele punten waarop het mis kan lopen, wordt de kans middelgroot geschat dat niet alle technieken getoetst kunnen worden.

Impact: middel, als het aantonen niet voor alle technieken lukt, is toch een groot deel van de doelstellingen van dit project bereikt. De doelstelling van de proof of concept is praktijkervaring. Praktijkervaring hangt vooral af van de tijd die besteed wordt aan configureren en testen. Of er nou aan één testopstelling drie weken gewerkt wordt of aan testopstellingen drie keer één week, dit levert dezelfde hoeveelheid praktijkervaring op. De competenties die afhangen van de proof of concept zijn het ontwerpen en het testen van een infrastructuur. Wanneer er minimaal één testnetwerk gebouwd en getest wordt, zijn de competenties in ieder geval allemaal aan bod gekomen.

Maatregelen: bij het doorlopen van de proof of concept zal er voordurend op worden gelet dat het hele traject 'vaststellen eisen, ontwerpen, bouwen, testen en rapporteren' in ieder geval één keer doorlopen wordt. Dus liever voor één Traffic Engineering techniek het gehele traject, dan voor alle techniek de eisen vaststellen en een netwerk ontwerpen om er vervolgens achter te komen dat er geen tijd meer is voor de overige onderdelen.

9. Op te leveren (tussen)producten

- Onderzoeksplan;
- Logboek onderzoek;
- Configuratiefiles;
- Testrapportage;
- Onderzoeksrapportage met daarin een beschrijving van:
  - de werking van een MPLS netwerk;
  - het begrip Traffic Engineering;
  - de gevonden MPLS Traffic Engineering technieken;
  - de mogelijkheden van de gevonden MPLS Traffic Engineering technieken;
  - de criteria voor de effectieve benutting van een MPLS netwerk;
  - de wijze waarop de Traffic Engineering technieken bij zouden kunnen dragen aan het effectiever benutten van een MPLS netwerk;
  - de eisen waaraan een testnetwerk dient te voldoen om te kunnen testen of de technieken het netwerk in de praktijk inderdaad effectiever benutten;
  - de netwerkontwerpen voor de praktijktesten;
- Afstudeerverslag (procesverslag).

Benodigde competenties

- A1 - Analyseren van het probleemdomein;
- A3 - Achterhalen van behoeften van belanghebbenden;
- A4 - Kiezen van een ontwikkelstrategie en ontwikkelmethodiek;
- A5 - Opstellen van systeemeisen;
- C9 - Ontwerpen van een infrastructuur;
- D18 - Testen van een infrastructuur;
- E23 - Fouten in systemen opsporen en verhelpen;
- E24 - Kwantitatieve analyse maken van de prestaties van systemen;
- G1 - Praktische aspecten hanteren in (internationale) projecten;
- H5 - Professioneel werken: Zelfstandig werken;
- H6 - Professioneel werken: Resultaatgericht werken;
- H7 - Professioneel werken: Methodisch werken.

Te demonstreren competenties en wijze waarop

Competentie	**Niveau**	**Behalen van deze competentie wordt aangetoond door het volgende (tussen)product(en), zoals genoemd bij punt 9**	**Product wordt conform planning opgeleverd in weeknr.**
A1 Analyseren van het probleemdomein	4	• onderzoeksplan • logboek onderzoek • onderzoeksrapportage	2 17 17
C9 Ontwerpen van een infrastructuur	3	• onderzoeksrapport, specifiek in het deel met de ontwerpen van de testnetwerken	17
D18 Testen van een infrastructuur	3	• testrapportage'	16

Persoonlijke verantwoording van keuze opdracht/bedrijf/competenties

Het gebruik van MPLS netwerken is enorm toegenomen in de afgelopen jaren en neemt ook nog steeds verder toe. MPLS is slechts zeer beknopt aan bod gekomen tijdens de CCNP colleges op de Haagse Hogeschool. Het onderdeel Traffic Engineering richt zich op de optimalisatie van MPLS netwerken. Het streven naar de beste mogelijke situatie in een netwerk is iets dat altijd al de interesse van de afstudeerder heeft gehad. Het afstuderen lijkt dan ook een uitgelezen kans voor verdieping in deze actuele technologie.

Nominale duur afstudeerperiode: 17 weken

Activiteitenplanning

		IJkpunten HHS [%]					30		45			60				80			100
		Week	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Onderdeel	**Activiteiten**																		
Onderzoeksplan	1. Bepalen zoekstrategie																		
	2. Opstellen onderzoeksplan																		
	3. Opleveren onderzoeksplan																		
Logboek onderzoek	4. Bijhouden logboek																		
	5. Opleveren logboek																		
Onderzoeksrapport	6. Literatuur verzamelen																		
	7. Literatuur bestuderen																		
	8. Beschrijven MPLS netwerk																		
	9. Beschrijven Traffic Engineering																		
	10. Beschr. gevonden MPLS TE technieken																		
	11. Beschr. mogelijkheden MPLS TE																		
	12. Beschr. criteria effectieve benutting																		
	13. Beschr. bijdrage effectievere benutting																		
	14. Bepalen eisen testnetwerk(en)																		
	15. Vastleggen eisen testnetwerk(en)																		
	16. Ontwerpen testnetwerk(en)																		
	17. Vastleggen ontwerpen testnetwerk(en)																		
	18. Bouwen testnetwerken																		
	19. Opleveren configuratiefiles																		
	20. Opstellen testplan																		
	21. Uitvoeren praktijktesten																		
	22. Opstellen testrapport																		
	23. Opleveren testrapportage																		
	24. Opstellen onderzoeksrapport																		
	25. Opleveren onderzoeksrapport																		
Afstudeerverslag	26. Opstellen afstudeerverslag																		
	27. Opleveren afstudeerverslag																		

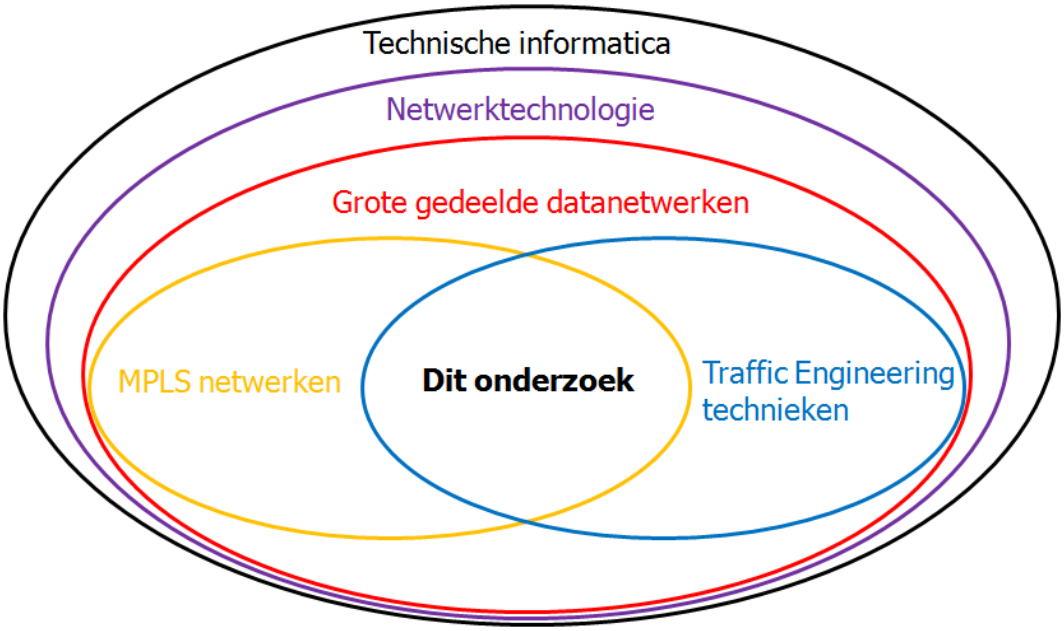
Naam opdrachtgever:
Handtekening voor akkoord:
Datum:

Naam bedrijfsmentor:
Handtekening voor akkoord
Datum:

Naam begeleider/examinator:
Handtekening voor akkoord:
Datum:

Naam expert/examinator:
Handtekening voor akkoord:
Datum:

Onderzoeksplan: Hoe kunnen Traffic Engineering technieken worden ingezet voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?



Versie: 1.00 Definitief

Auteur:Sebastiaan van de Grint (studentnummer 4401)

Opdrachtgever: Richard Schmidt
Blok: TI-dt G3 Afstuderen

Den Haag, 19 november 2009

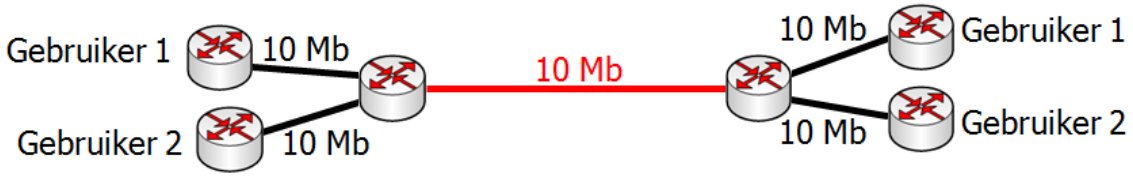
Inhoudsopgave Pagina

1. Inleiding

Dit onderzoek wordt uitgevoerd in het kader van het afstuderen van de studie Technische Informatica deeltijd aan de Haagse Hogeschool. De duur van het onderzoek is 17 weken. Grote delen van dit onderzoeksplan zijn rechtstreeks overgenomen uit het eerder opgestelde afstudeerplan. Een paar kleine verduidelijkingen in de rechtstreeks overgenomen delen zijn geel gemarkeerd voor het gemak van diegenen die het afstudeerplan reeds gelezen hebben. Nieuw in dit document zijn de onderdelen 'Verantwoording', 'Theoretisch kader', 'Faseringsschema', 'Onderzoeksstrategie' en 'Literatuur'.

1.1 Aanleiding

Heel veel grote datanetwerken, zoals bijvoorbeeld een groot aantal Internet Service Provider (ISP) netwerken, zijn gedeeld. Met gedeeld wordt bedoeld dat de capaciteit van het netwerk door verschillende gebruikers gedeeld wordt. Gedeelde netwerken zijn vrijwel altijd overboekt, wat inhoudt dat er meer verkeer naar het netwerk kan, dan er over het netwerk getransporteerd kan worden. Stel dat een netwerkverbinding van 10 Mbit gedeeld wordt door 2 gebruikers dan heet dat een 1:2 overboeking, figuur 1 laat dit zien. Beide gebruikers hebben een 10 Mbit verbinding (zwarte lijnen) naar de netwerkverbinding (rode lijn). Als gebruiker 2 de verbinding niet gebruikt, heeft gebruiker 1 de volledige 10 Mbit ter beschikking. Bij gelijktijdig gebruiker krijgen beide gebruikers 5 Mbit. Voordeel van het overboeken is dat beide gebruikers de kosten voor de verbinding delen en dus als het ware betalen voor een 5 Mb verbinding, terwijl zij gedurende een gedeelte van de tijd 10 Mb ter beschikking hebben.



Figuur 1. 10 Mb netwerkverbinding die door 2 gebruikers gedeeld wordt (1:2 overboeking).

Het voorbeeld is voor één netwerkverbinding met twee gebruikers, maar hetzelfde principe wordt toegepast op grote netwerken met vele gebruikers. Door de overboeking is het onvermijdelijk dat er op een gegeven moment congestion (opstopping) op bepaalde verbindingen ontstaat. Zodra gebruiker 1 en 2 beide 10 Mbit naar de verbinding sturen komt er 20 Mbit aan terwijl er maar 10 Mbit over de verbinding kan. In dat geval is er dus sprake van congestion.

In het geval van congestion spelen twee verzamelingen van technieken een belangrijke rol, te weten Quality of Service (QoS) en Traffic Engineering (TE). QoS zorgt ervoor dat belangrijker verkeer voorrang krijgt tijdens congestion. QoS regelt alleen de prioritering van het dataverkeer op één verbinding, namelijk de verbinding waar op dat moment congestion optreedt. QoS regelt het dataverkeer dus alleen lokaal. Traffic Engineering zorgt voor het omleiden van dataverkeer tijdens congestion en een betere verdeling van het dataverkeer over alle beschikbare verbindingen. Traffic Engineering is dus een verzameling technieken die bedoeld zijn om het verkeer op het gehele netwerk te regelen. Hoewel QoS en Traffic Engineering dus beiden van

toepassing zijn bij congestion, zijn het twee compleet verschillende takken van sport. Beiden kunnen zowel los als naast elkaar worden toegepast.

Mede omdat MPLS (Multiprotocol Label Switching) een goede implementatie van QoS en Traffic Engineering mogelijk maakt, is de populariteit van MPLS netwerken enorm toegenomen. Vrijwel alle grote ISP's hebben een MPLS netwerk, een voorbeeld is het KPN Epacity netwerk (MPLS-VPN).

MPLS als label-switching techniek en MPLS-VPN als netwerk met (Virtual Private Network) VPN service zijn de enige MPLS onderdelen die behandeld zijn tijdens de CCNP colleges op de Haagse Hogeschool (HHS). MPLS QoS is aan bod gekomen bij onderzoeken die door de afstudeerder uitgevoerd zijn tijdens de blokken TI5 en TI7 aan de HHS.

1.2 Probleemstelling

Omdat de afstudeerder geen kennis van en ervaring met MPLS Traffic Engineering heeft, dient de volgende vraag gesteld te worden: hoe kunnen Traffic Engineering technieken worden ingezet voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?
Om tot een antwoord op deze vraag te komen, zullen de onderstaande deelvragen beantwoord moeten worden:

1. Wat is een MPLS netwerk?
2. Wat is Traffic Engineering?
3. Welke MPLS Traffic Engineering technieken zijn er?
4. Welke mogelijkheden bieden de MPLS Traffic Engineering technieken?
5. Welke criteria bepalen de effectiviteit van de benutting van een (MPLS) netwerk?
6. Hoe effectief wordt een MPLS netwerk zonder Traffic Engineering technieken benut?
7. Hoe zouden de gevonden Traffic Engineering technieken bij kunnen dragen aan het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?
8. Hoe zou het effectiever benutten van het netwerk door toepassing van deze technieken in de praktijk getest kunnen worden?
9. Welk netwerk is nodig voor zo'n praktijktest?
10. Zorgen deze technieken in de praktijk inderdaad voor een effectievere benutting van het netwerk?

1.3 Doelstelling

De eerste vraag heeft als doel de lezer inzicht te geven in de globale werking van een netwerk waarbij MPLS wordt toegepast om datapakketjes te switchen. De tweede vraag geeft zowel de lezer als de afstudeerder inzicht in het begrip Traffic Engineering in het algemeen, wat behoort wel en wat behoort niet tot Traffic Engineering. Het doel van de derde vraag is om vast te stellen welke MPLS Traffic Engineering technieken er zijn. Vraag 4 heeft als doel de lezer en de afstudeerder kennis te verschaffen over de mogelijkheden van de MPLS Traffic Engineering technieken. De vijfde vraag geeft de lezer en afstudeerder inzicht in de factoren die de effectieve benutting van een MPLS netwerk bepalen. Vraag 6 heeft als doel voor de lezer en de afstudeerder om de referentiesituatie met standaard routering helder te maken. Het doel van vraag 7 is om de lezer en afstudeerder inzicht te geven in de manier waarop deze technieken bij zouden kunnen

dragen aan een effectievere benutting van het netwerk. Vraag 8 heeft als doel voor de lezer en de afstudeerder in kaart te brengen op welke manier in de praktijk getest kan worden of deze technieken het netwerk inderdaad effectiever benutten dan een netwerk zonder deze technieken. De afstudeerder doet daarnaast ook ervaring op in het bepalen en het vastleggen van de eisen aan een testnetwerk. De negende vraag is enerzijds bedoeld om de afstudeerder ervaring op te laten doen met het vertalen van de eisen aan het testnetwerk in een netwerkontwerp waarin MPLS Traffic Engineering technieken worden toegepast. En anderzijds om ervaring op te doen met het daadwerkelijk bouwen van het ontworpen netwerk en het toepassen van de geleerde technieken. Doel van vraag 10 is voor de afstudeerder het opdoen van ervaring in het analyseren van testresultaten en het verbinden van conclusies aan deze testresultaten. Daarnaast geeft deze vraag de lezer en de afstudeerder inzicht in de werking van de technieken in de praktijk ten aanzien van het effectiever benutten van het netwerk.

De hoofdvraag geeft de lezer en de afstudeerder kennis van en inzicht in de manier waarop MPLS Traffic Engineering technieken kunnen worden ingezet voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk. De afstudeerder doet naast kennis en inzicht ook nog praktijkervaring op in het toepassen van de technieken.

1.4 Resultaat

Het belangrijkste resultaat is een onderzoeksrapport. In het rapport zal worden uitgelegd wat MPLS netwerken zijn en wat Traffic Engineering is. In het rapport zal tevens beschreven worden welke specifieke MPLS Traffic Engineering technieken er zijn en wat de mogelijkheden van deze technieken zijn. Daarna wordt vastgelegd welke criteria bepalen hoe effectief een MPLS netwerk benut wordt. Vervolgens wordt in het rapport ingegaan op de mate waarin een MPLS netwerk effectief benut wordt in de referentiesituatie met standaard routering. Uiteraard zal in het rapport ook worden ingegaan op de manier waarop deze technieken zouden kunnen bijdragen aan het effectiever benutten van een MPLS netwerk. Er zal worden beschreven hoe de effectiviteit van deze technieken in de praktijk getest zou kunnen worden. De ontwerpen van de testnetwerken zullen ook worden opgenomen in de rapportage. Het rapport wordt afgesloten met een conclusie, waarin de hoofdvraag beantwoord zal worden. De configuratiefiles van de daadwerkelijk gebouwde netwerken en het testplan met een beschrijving van de (resultaten van de) praktijktesten zullen als bijlage worden toegevoegd aan de rapportage. Naast het onderzoeksrapport wordt een afstudeerverslag met daarin de procesbeschrijving van het gehele afstudeertraject opgeleverd.

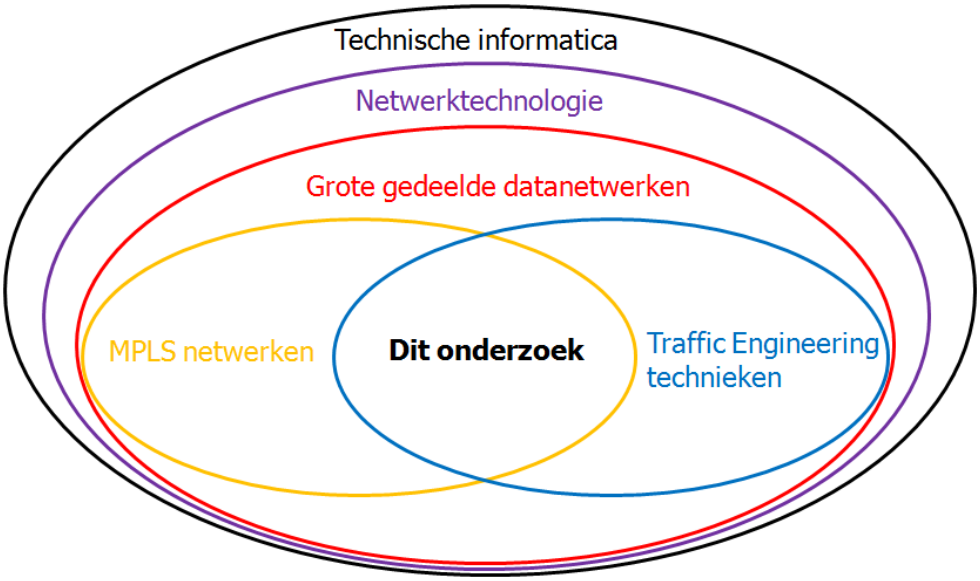
2. Verantwoording

Zoals genoemd is het belangrijkste doel voor de afstudeerder het opdoen van kennis en ervaring met het toepassen van Traffic Engineering technieken voor het effectiever benutten van MPLS netwerken met standaardroutering. Het onderzoek is dan ook bedoeld als leeronderzoek voor de afstudeerder. De nadruk van het onderzoek ligt vooral op het verkennen en vastleggen van de mogelijkheden van Traffic Engineering in MPLS netwerken en niet zozeer op nieuwe toepassingen of inzichten. Het onderzoeksrapport zal qua omvang en diepgang het midden houden tussen een artikel en een boek. Daardoor zal de lezer die zich wil oriënteren op dit gebied een veel uitgebreider beeld krijgen van de mogelijkheden van de technieken dan in een artikel. De goed gedocumenteerde praktijktesten zullen daarbij een mooie aanvulling zijn. De persoonlijke reden om voor dit onderwerp te kiezen wordt hieronder beschreven.

Het gebruik van MPLS netwerken is enorm toegenomen in de afgelopen jaren en neemt ook nog steeds verder toe. MPLS is slechts zeer beknopt aan bod gekomen tijdens de CCNP colleges op de Haagse Hogeschool. Het onderdeel Traffic Engineering richt zich op de optimalisatie van MPLS netwerken. Het streven naar de beste mogelijke situatie in een netwerk is iets dat altijd al de interesse van de afstudeerder heeft gehad. Deze kennis is niet alleen interessant maar ook waardevol. Als een bestaand netwerk effectiever benut kan worden, kan er meer data overheen. Voor bijvoorbeeld een ISP betekent dit dat er meer klanten kunnen worden aangesloten zonder dat de capaciteit van het netwerk vergroot hoeft te worden. Hierdoor kan bespaard worden op de kosten voor het aanleggen van nieuwe verbindingen en dat is iets waar een ISP voordurend mee bezig is. Het afstuderen lijkt dan ook een uitgelezen kans voor verdieping in deze actuele technologie.

3. Theoretisch kader

Zoals genoemd wordt dit afstudeeronderzoek uitgevoerd in het kader van de studie Technische Informatica aan de Haagse Hogeschool. De twee hoofdonderdelen van de studie zijn Technische Informatie Systemen en netwerktechnologie, dit onderzoek speelt zich af op het gebied van de netwerktechnologie. Binnen de netwerktechnologie richt dit onderzoek zich op grote gedeelde datanetwerken. En meer specifiek op die grote gedeelde datanetwerken die gebruikmaken van MPLS om datapakketjes te switchen. Bij alle grote gedeelde datanetwerken kunnen Traffic Engineering technieken gebruikt worden. Met deze technieken kan een netwerk effectiever benut worden dan zonder deze technieken. Dit onderzoek richt zich specifiek op het inzetten van Traffic Engineering bij grote gedeelde MPLS datanetwerken.



Figuur 2. Schematische weergave van het theoretisch kader van dit onderzoek

4. Op te leveren (tussen)producten

- Onderzoeksplan;
- Logboek onderzoek;
- Configuratiefiles;
- Testrapportage;
- Onderzoeksrapportage met daarin een beschrijving van:
  - de werking van een MPLS netwerk;
  - het begrip Traffic Engineering;
  - de gevonden MPLS Traffic Engineering technieken;
  - de mogelijkheden van de gevonden MPLS Traffic Engineering technieken;
  - de criteria voor de effectieve benutting van een MPLS netwerk;
  - de wijze waarop de Traffic Engineering technieken bij zouden kunnen dragen aan het effectiever benutten van een MPLS netwerk;
  - de eisen waaraan een testnetwerk dient te voldoen om te kunnen testen of de technieken het netwerk in de praktijk inderdaad effectiever benutten;
  - de netwerkontwerpen voor de praktijktesten;
  - conclusie waarin antwoord gegeven wordt op de hoofdvraag;
- Afstudeerverslag (procesverslag).

5. Plan van Aanpak

5.1 Te hanteren methodieken

Het onderzoek zal worden voorbereid en uitgevoerd conform de methodieken beschreven in onderstaande boeken. Voor dit onderzoek zullen met name de stukken die betrekking hebben op het onderzoekstype 'ontwerponderzoek' worden gebruikt.

1. Oost, H., Markenhof, A., *Een onderzoek voorbereiden*, (2002, eerste druk, tiende oplage 2008), Baarn: HBuitgevers;
2. Oost, H., *Een onderzoek uitvoeren*, (2002, eerste druk, zevende oplage 2008), Baarn: HBuitgevers.

5.2 Uit te voeren activiteiten

1. bepalen zoekstrategie;
2. opstellen onderzoeksplan;
3. opleveren onderzoeksplan;
4. bijhouden logboek;
5. opleveren logboek;
6. literatuur verzamelen;
7. literatuur bestuderen;
8. beschrijven globale werking MPLS netwerk in onderzoeksrapportage;
9. beschrijven van het begrip Traffic Engineering in onderzoeksrapportage;
10. beschrijven welke MPLS Traffic Engineering technieken er gevonden zijn in onderzoeksrapportage;
11. beschrijven mogelijkheden gevonden MPLS Traffic Engineering technieken in onderzoeksrapportage;
12. beschrijven criteria effectieve benutting van een MPLS netwerk;
13. beschrijven mogelijke bijdrage gevonden technieken aan het effectiever benutten van MPLS netwerk; in onderzoeksrapportage
14. bepalen eisen netwerk(en) praktijktesten;
15. vastleggen eisen netwerk(en) praktijktesten in onderzoeksrapportage;
16. ontwerpen netwerk(en) praktijktesten;
17. ontwerpen netwerk(en) praktijktesten vastleggen in onderzoeksrapportage;
18. bouwen netwerk(en) praktijktesten;
19. opleveren configuratiefiles;
20. opstellen testplan;
21. uitvoeren praktijktesten met en zonder Traffic Engineering technieken;
22. uitkomsten praktijktesten vastleggen in testrapportage;
23. opleveren testrapportage;
24. opstellen onderzoeksrapport;
25. opleveren onderzoeksrapport;
26. opstellen afstudeerverslag
27. opleveren afstudeerverslag.

5.3 Faseringschema

Conform de in hoofdstuk 5.1 genoemde methodieken wordt een onderzoek ingedeeld in vier fasen: 1. Voorbereiden onderzoek, 2. Materiaal verzamelen, 3. Materiaal analyseren en 4. Rapporteren. In figuur 3 zijn de activiteiten ingedeeld conform deze onderzoeksfasen. Het 'Proof of Concept' gedeelte met de praktijktesten is daarbij als subonderzoek ingedeeld omdat het een groot gedeelte van het totale onderzoek beslaat. Ten opzicht van het afstudeerplan is er één wijziging in de activiteiten. Activiteit '21. Uitvoeren praktijktesten' is opgesplitst in het uitvoeren en het analyseren van de uitkomsten. Dit is gedaan om duidelijk te maken dat de uitkomsten niet zo maar voor waar worden aangenomen. Bij het opstellen van het testplan zal de verwachte uitkomst gegeven worden. Tijdens de uitvoering zal vervolgens gekeken worden of de uitkomsten aan de verwachting voldoen. Mocht dat niet zo zijn zal hiervoor een verklaring worden gezocht. Indien nodig zullen de eisen aan het testnetwerk of de testen zelf worden bijgesteld, waarna stap 14 t/m 23 opnieuw doorlopen zullen worden.

Fase hoofdonderzoek
Onderzoek voorbereiden
1. Bepalen zoekstrategie
2. Opstellen onderzoeksplan
3. Opleveren onderzoeksplan
Materiaal verzamelen
6. Literatuur verzamelen
Materiaal analyseren
7. Literatuur bestuderen
subonderzoek proof of concept
Rapporteren
8. Beschrijven MPLS netwerk
9. Beschrijven Traffic Engineering
10. Beschr. gevonden MPLS TE technieken
11. Beschr. mogelijkheden MPLS TE
12. Beschr. criteria effectieve benutting
13. Beschr. bijdrage effectievere benutting
24. Opstellen onderzoeksrapport
25. Opleveren onderzoeksrapport

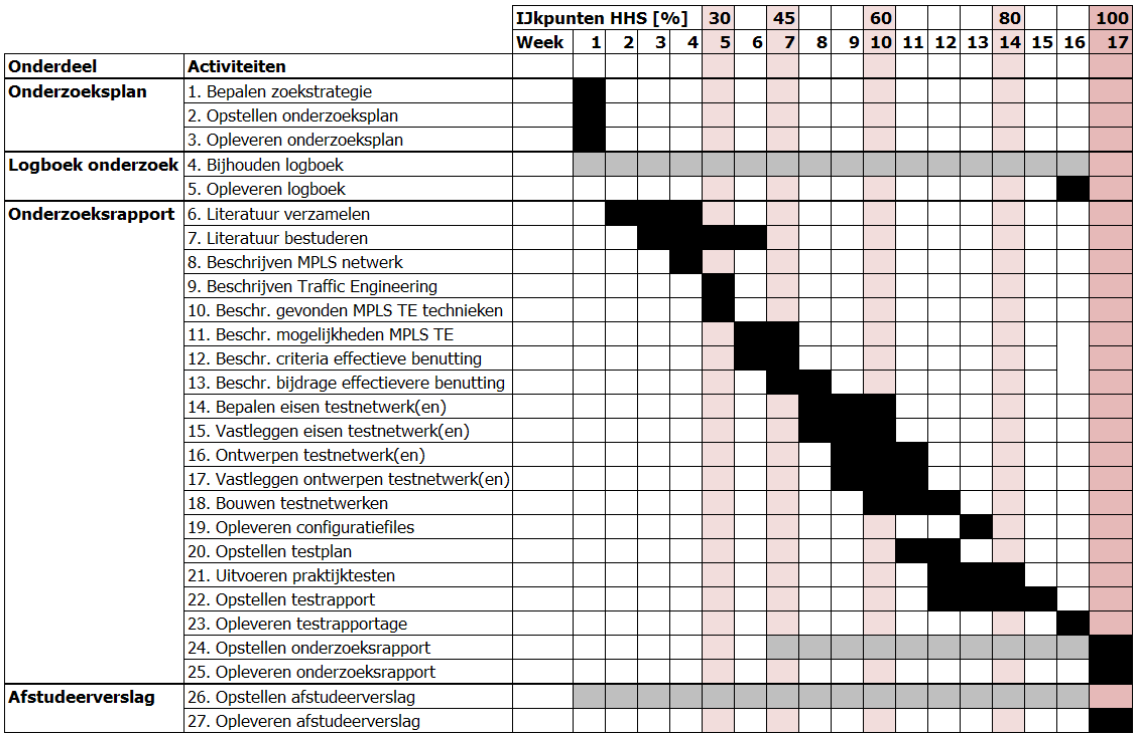
Fase subonderzoek 'Proof of Concept'
Onderzoek voorbereiden
14. Bepalen eisen testnetwerk(en)
15. Vastleggen eisen testnetwerk(en)
16. Ontwerpen testnetwerk(en)
17. Vastleggen ontwerpen testnetwerk(en)
18. Bouwen testnetwerken
19. Opleveren configuratiefiles
20. Opstellen testplan
Materiaal verzamelen
21. Uitvoeren praktijktesten
Materiaal analyseren
21A. Analyseren uitkomsten praktijktesten
Rapporteren
22. Opstellen testrapport
23. Opleveren testrapportage

Figuur 3. Activiteiten ingedeeld naar onderzoeksfase.

De activiteiten bijhouden logboek, opleveren logboek, opstellen afstudeerverslag en opleveren afstudeerverslag horen niet specifiek bij één onderzoeksfase. Deze activiteiten zijn derhalve niet opgenomen in figuur 3.

5.4 Activiteitenplanning

Het onderzoek duurt 17 weken. Figuur 4 geeft de activiteiten uit hoofdstuk 5.2 schematisch weer.



Figuur 4. Schema tijdsplanning activiteiten

Bij de inschatting van de tijdsbesteding voor de activiteiten van figuur 4 is rekening gehouden met enige uitloop ten gevolge van tegenslagen. Omdat de uitloop al is verdisconteerd in de losse onderdelen is er aan het einde van het project geen extra uitloop opgenomen.

5.5 Onderzoekstrategie

5.5.1 Reeds beschikbare literatuur

Bij het zoeken naar een geschikt afstudeeronderwerp heeft de afstudeerder het boek 'Traffic Engineering with MPLS' van Eric Osborne en Ajay Simha gevonden. Aangezien dit boek geheel gewijd is aan het toepassen van Traffic Engineering technieken in MPLS netwerken lijkt dit een goed startpunt voor dit onderzoek. Het boek is in 2002 uitgegeven door Cisco Press. Zowel het jaartal als de uitgever zijn een aandachtspunt. Gezien de snelle ontwikkelingen in de netwerkwereld, bestaat de kans dat de informatie verouderd is. De uitgever (eigendom van Cisco Systems) heeft als aandachtspunt dat eventuele Cisco proprietary technieken mogelijk niet (geheel) objectief worden beoordeeld. Beide aandachtspunten zullen ondervangen worden door de gevonden informatie te verifiëren met recentere literatuur, dan wel literatuur van een andere (onafhankelijke) uitgever.

Behalve de aandachtspunten (mogelijke nadelen) heeft het boek ook voordelen:

- het is geschreven door twee netwerkexperts (Cisco Certified Internetwork Experts);
- Cisco is marktleider en daarmee vaak ook toonaangevend;
- de inhoudsopgave laat zien dat het boek naast het theoretische deel ingaat op het configureren en troubleshooten van MPLS Traffic Engineering technieken, wat belangrijk is voor het 'proof of concept' deel van dit onderzoek.

5.5.2 Ontbrekende literatuur

Het voornaamste doel van dit onderzoek is het verkrijgen van kennis over en ervaring met het inzetten van Traffic Engineering technieken voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk. Om dit doel te bereiken is uitgebreide goed onderbouwde informatie nodig. Het liefst ook nog voorzien van voldoende uitleg over de technieken en met praktijkvoorbeelden van het inzetten van de technieken. Dat is de reden dat de voorkeur voor dit onderzoek meer uitgaat naar boeken dan naar artikelen. Artikelen zijn over het algemeen maximaal ca. 10 pagina's lang. Het is onmogelijk om in 10 pagina's alle gezochte informatie te geven.

Gezocht zal worden naar minimaal 2 andere boeken die geheel of gedeeltelijk over het inzetten van Traffic Engineering technieken in MPLS netwerken gaan. De boeken dienen bij voorkeur recenter te zijn dan het reeds beschikbare boek en van een onafhankelijke uitgever. Gecontroleerd zal worden of alle boeken dezelfde technieken benoemen en de werking en toepassing van de technieken overeenkomstig beschrijven. Indien dit het geval is, is het waarschijnlijk dat de informatie compleet is (behoudens recente ontwikkelingen, zie uitleg volgende paragraaf). En dat er binnen de netwerkwereld een eenduidige visie bestaat over de werking en toepassing van Traffic Engineering technieken.

Hoewel de voorkeur uitgaat naar boeken is er één belangrijke reden om toch naar artikelen te zoeken. Die reden is dat nieuwe ontwikkelingen over het algemeen sneller in artikelen worden besproken dan in boeken. Informatie in een boek is over het algemeen minimaal een jaar oud, vanwege de tijd die het kost om een boek uit te geven. Informatie in artikelen is op het moment van publicatie meestal slechts één tot ca. 6 maanden oud. Er zal dus wel gezocht worden naar artikelen die recenter zijn dan het recentste gevonden boek. Daarnaast bestaat er ook nog de mogelijkheid dat er over een bepaalde techniek onvoldoende informatie in boekvorm te vinden is. In dat geval zal geprobeerd worden om één of meerdere artikelen te vinden om de informatie te verifiëren.

5.5.3 Mogelijke bronnen ontbrekende literatuur

Bij de zoektocht naar andere literatuur zullen in ieder geval de volgende bronnen geraadpleegd worden:

- Bibliotheek TU Delft: grote collectie wetenschappelijke boeken, tijdschriften en artikelen;
- Picarta: online systeem om te zoeken in catalogi van bibliotheken en in online content van vele wetenschappelijke artikelen;
- books.google.nl: bevat tegenwoordig ook zeer veel (delen van) wetenschappelijke boeken.
- www.amazon.com: een van 's werelds grootste websites voor (tweedehands) boeken. Vaak is de inhoudsopgave van boeken in te zien, wat een redelijk beeld geeft van de diepgang per onderwerp (bijvoorbeeld: gaan er slechts 2 pagina's over Traffic Engineering of zijn dat 50). Indien zeer interessante boeken gevonden worden die noodzakelijk lijken voor dit onderzoek en die niet bij google of in een bibliotheek in de buurt voorhanden zijn, kunnen deze mogelijk via amazon gekocht worden.

5.5.4 Zoekstrategie voor ontbrekende literatuur

Voor het zoeken naar de ontbrekende literatuur zullen de in hoofdstuk 5.5.3 genoemde bronnen geraadpleegd worden. Zoals aangegeven wordt in eerste instantie naar boeken gezocht. 'MPLS' en/of 'Traffic Engineering' zijn de eerste zoektermen. Afhankelijk van het aantal zoekresultaten zal verfijning plaats moeten vinden.
Verfijning kan voor dit onderzoek door:

- alleen te zoeken naar boeken met een recentere publicatie datum dan die van de beschikbare literatuur;
- namen van gevonden technieken uit de beschikbare literatuur als extra zoekterm(en) toe te voegen;
- zoeken naar boeken met bijvoorbeeld MPLS en Traffic Engineering in de titel.

Zodra een maximum aantal zoekresultaten van ca. 30 is bereikt, kan de daadwerkelijke selectie beginnen. Selectie zal gebeuren door onderstaande stappen te doorlopen:

1. Titel bekijken: alleen als uit de titel blijkt dat het boek duidelijk niet geschikt is voor dit onderzoek valt het boek af, bij enige twijfel door naar stap 2.
2. Inhoudsopgave bekijken: op basis van aantal pagina's of gedeelte van het boek dat over Trafffic Engineering in MPLS netwerken gaat wordt de volgende keuze gemaakt. Veel pagina's betekent door naar stap 3, weinig pagina's betekent boek valt af, bij twijfel boek op reservelijst.
3. Beschikbaarheid boek: voorkeur gaat uit naar boeken die beschikbaar zijn in de TU-Delft bibliotheek of via books.google.com. Niet al te dure boeken of zeer interessante boeken kunnen eventueel worden aangeschaft via www.amazon.com of een andere (online) boekwinkel.

Hoe minder zoekresultaten er zijn, hoe soepeler de genoemde selectiecriteria zullen worden toegepast.

Het uiteindelijke doel van het zoeken is het vinden van informatie waarmee de deelvragen en de hoofdvraag beantwoord kunnen worden. De vragen zijn voor de volledigheid onderaan deze

pagina nogmaals opgenomen. De verwachting is dat de antwoorden op vraag 1 t/m 4, 6 en 7 in de literatuur, die na het zoeken beschikbaar is, gevonden kunnen worden. Hoofdstuk 2 van (Osborne en Simha, 2002) geeft 65 pagina's aan basisinformatie over MPLS. Dit zou voldoende moeten zijn voor een globale beschrijving van de werking van MPLS netwerken. Indien toch meer gedetailleerde informatie nodig blijkt, zullen mogelijk nog een of meerdere boeken over MPLS netwerken gezocht dienen te worden.

Het antwoord op vraag 5 dient mogelijk door de afstudeerder zelf afgeleid te worden uit de literatuur. Het lijkt op voorhand onwaarschijnlijk dat de literatuur een definitie van de effectiviteit van de benutting van een (MPLS) netwerk zal geven. Waarschijnlijk worden echter wel voorbeelden gegeven, waarbij het netwerk na het inzetten van een Traffic Engineering techniek effectiever worden benut. Uit deze voorbeelden kunnen dan effectiviteitcriteria worden afgeleid. Wanneer dit niet lukt, dient gezocht worden naar meer algemene informatie over het effectief benutten van een netwerk.

De antwoorden op vraag 4 t/m 7 zouden voldoende informatie moeten opleveren om vraag 8 te kunnen beantwoorden. Vraag 9 kan beantwoord worden door bij het antwoord op vraag 8 opgestelde eisen en randvoorwaarden aan het testnetwerk te vertalen in een netwerkontwerp. Vraag 10 kan beantwoord worden met behulp van de uitkomsten van de praktijktesten. Indien alle deelvragen beantwoord zijn, kan de hoofdvraag ook beantwoord worden.

Deelvragen:

1. Wat is een MPLS netwerk?
2. Wat is Traffic Engineering?
3. Welke MPLS Traffic Engineering technieken zijn er?
4. Welke mogelijkheden bieden de MPLS Traffic Engineering technieken?
5. Welke criteria bepalen de effectiviteit van de benutting van een (MPLS) netwerk?
6. Hoe effectief wordt een MPLS netwerk zonder Traffic Engineering technieken benut?
7. Hoe zouden de gevonden Traffic Engineering technieken bij kunnen dragen aan het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?
8. Hoe zou het effectiever benutten van het netwerk door toepassing van deze technieken in de praktijk getest kunnen worden?
9. Welk netwerk is nodig voor zo'n praktijktest?
10. Zorgen deze technieken in de praktijk inderdaad voor een effectievere benutting van het netwerk?

Hoofdvraag:

Hoe kunnen Traffic Engineering technieken worden ingezet voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?

De planning geeft aan dat er uiterlijk tot en met week 4 actief naar literatuur wordt gezocht. De gevonden literatuur wordt vervolgens tot en met week 6 bestudeerd. Uiteraard is het doel van deze zoekstrategie om literatuur te vinden waarmee een compleet beeld van de mogelijke MPLS

Traffic Engineering technieken wordt verkregen. Desondanks kan het natuurlijk altijd gebeuren dat op een later tijdstip in dit onderzoek nog informatie over (nieuwe) Traffic Engineering technieken naar boven komt. Besloten wordt om deze informatie alleen nog op te nemen in de rapportage als deze voor week 12 gevonden wordt. Afhankelijk van de impact zal besloten worden of deze technieken nog meegenomen kunnen worden in de praktijktesten.

6. Risico's en maatregelen

Nr.	Omschrijving	Kans	Impact
1	Bouwen testnetwerk niet mogelijk	Klein	Groot
2	Proof of concept lukt niet voor alle Traffic Engineering technieken	Middel	Middel

Bouwen testnetwerk niet mogelijk

Uitleg risico: MPLS TE wordt veelal toegepast in grote (ISP) netwerken, het is erg lastig om in te schatten hoe groot het netwerk moet zijn voor een proof of concept. Voor het bouwen van een testnetwerk zal het waarschijnlijk noodzakelijk zijn om de te emuleren routers (met behulp van GN3 of Dynamips) over meerdere PC's te verdelen, omdat op één PC slechts ca. 6 routers geëmuleerd kunnen worden. Een kort onderzoekje op internet leert dat dit mogelijk moet zijn.

Kans: klein, de kans wordt klein geschat dat het testnetwerk niet gebouwd kan worden, omdat het korte onderzoek op internet heeft uitgewezen dat het mogelijk moet zijn.

Impact: groot, het bouwen van het testnetwerk is zeer belangrijk voor het toetsen van de werking van de MPLS Traffic Engineering technieken en voor de ontwerp en test competenties. De impact van dit risico wordt daarom als groot ingeschat.

Maatregelen: Mocht het emuleren over meerdere PC's om wat voor reden dan ook niet lukken, zal gebruik gemaakt worden van het laboratorium van de Haagse Hogeschool voor de 'proof of concept'.

Proof of concept lukt niet voor alle Traffic Engineering technieken

Uitleg risico: op dit moment is het erg moeilijk om in te schatten hoeveel tijd het toetsen van de werking van de MPLS Traffic Engineering technieken gaat kosten. Het is nog onduidelijk op welke manier de effectiviteit gemonitord dient te worden. Er is onbekend hoeveel technieken getest dienen te worden. Tevens is de grootte van het benodigde testnetwerk onbekend. En het is onbekend of de testen allemaal op één testnetwerk uitgevoerd kunnen worden.

Kans: middel, gezien de vele punten waarop het mis kan lopen, wordt de kans middelgroot geschat dat niet alle technieken getoetst kunnen worden.

Impact: middel, als het aantonen niet voor alle technieken lukt, is toch een groot deel van de doelstellingen van dit project bereikt. De doelstelling van de proof of concept is praktijkervaring. Praktijkervaring hangt vooral af van de tijd die besteed wordt aan configureren en testen. Of er nou aan één testopstelling drie weken gewerkt wordt of aan testopstellingen drie keer één week, dit levert dezelfde hoeveelheid praktijkervaring op. De competenties die afhangen van de proof of concept zijn het ontwerpen en het testen van een infrastructuur. Wanneer er minimaal één testnetwerk gebouwd en getest wordt, zijn de competenties in ieder geval allemaal aan bod gekomen.

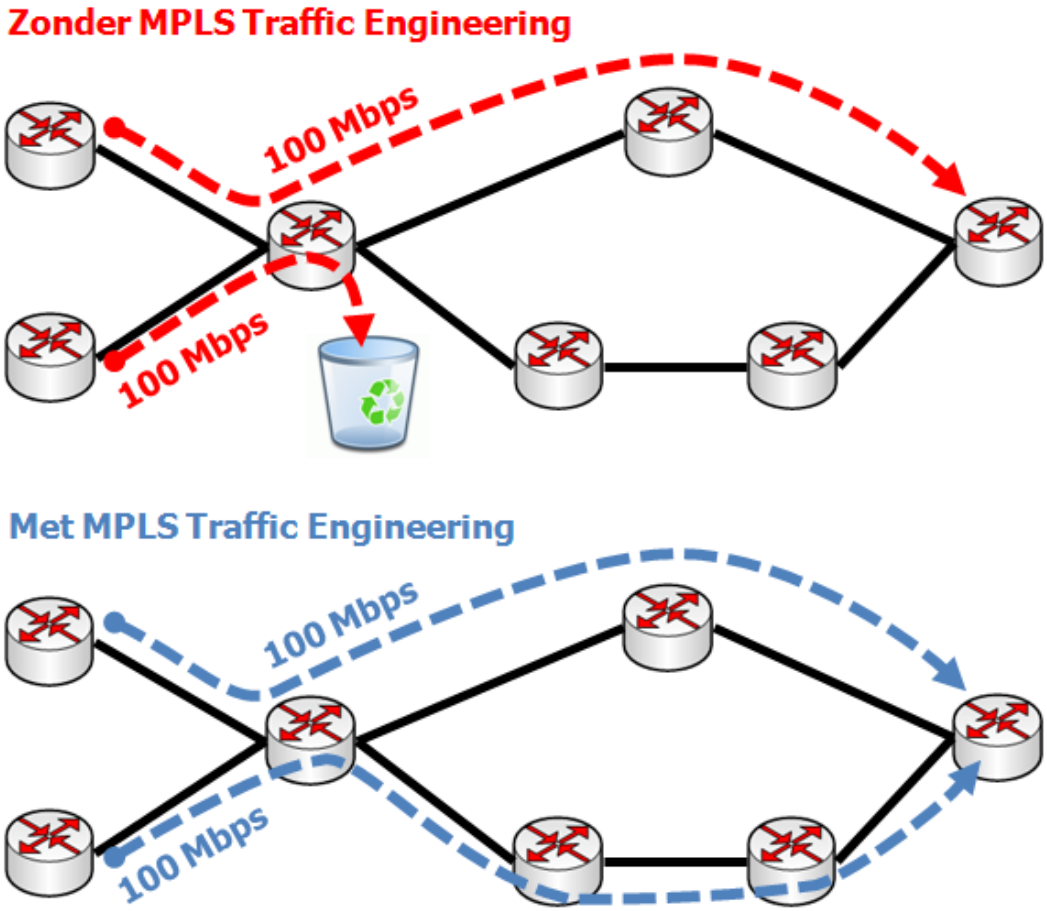
Maatregelen: bij het doorlopen van de proof of concept zal er voordurend op worden gelet dat het hele traject 'vaststellen eisen, ontwerpen, bouwen, testen en rapporteren' in

ieder geval één keer doorlopen wordt. Dus liever voor één Traffic Engineering techniek het gehele traject, dan voor alle techniek de eisen vaststellen en een netwerk ontwerpen om er vervolgens achter te komen dat er geen tijd meer is voor de overige onderdelen.

7. Literatuur

1) Osborne, E., Simha, A., *Traffic Engineering with MPLS*, (2002, eerste druk), Indianapolis USA: Cisco Press;
2) Morgan, B., Lovering, N., *CCNP ISCW*, (2007, tweede druk) , Indianapolis USA: Cisco Press.

Onderzoeksrapport: Hoe kunnen Traffic Engineering technieken worden ingezet voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?



Versie: 1.0 definitief

Auteur:Sebastiaan van de Grint (studentnummer 4401)

Opdrachtgever: Richard Schmidt
Blok: TI-dt G3 Afstuderen

Den Haag, 29 maart 2010

Referaat

Titel: Hoe kunnen Traffic Engineering technieken worden ingezet voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?

Auteur: Sebastiaan van de Grint (studentnummer 4401)

Omschrijving: Dit rapport beschrijft een onderzoek naar de mogelijkheden van MPLS Traffic Engineering technieken. Dat zijn technieken waarmee de route die een datapakketje door een MPLS netwerk volgt, beïnvloed kan worden. Zonder deze technieken volgt al het dataverkeer de route die het routing protocol bepaalt, wat normaal gesproken overeenkomt met de kortste route. Met deze technieken is het mogelijk om het dataverkeer een andere route dan de kortste te laten nemen. De technieken kunnen worden ingezet voor Load Sharing doeleinden: het verdelen van het dataverkeer over verschillende routes van A naar B met een ongelijke cost. Voor Quality of Service doeleinden: het bereiken van een lage end-to-end delay. Voor Recovery en Protection doeleinden: het beperken van dataverlies (minder dan 50 ms) bij uitval router of verbinding, door razendsnelle backup routes. Al deze toepassingen zorgen voor een effectievere benutting van een netwerk met standaard routering. Dit onderzoek bevat zowel een theoretisch deel als een Proof of Concept middels praktijktesten.

Keywords: MPLS, Traffic Engineering, netwerkoptimalisatie, DiffServ, QoS

Voorwoord

In het kader van het afstuderen van mijn studie Technische Informatica aan de Haagse Hogeschool heb 17 weken gewerkt aan dit onderzoek naar de mogelijkheden van MPLS Traffic Engineering. Ik heb me met heel veel plezier verdiept in de literatuur van dit interessante vakgebied. Ook het bouwen van de testopstellingen en het uitvoeren van de praktijktesten was erg leuk en leerzaam.

Ik wil mijn begeleider examinator Bart Jan Koning bedanken voor het meedenken over de juiste opzet van dit onderzoek en voor de concrete en heldere feedback die ik gedurende het gehele traject heb gekregen. Ook wil ik mijn expert examinator Hans Witkamp bedanken voor de vele goede adviezen tijdens mijn afstudeertraject en voor het regelen van de sleutel van het Ciscolab, waarmee ik onbeperkt toegang had tot de praktijkruimte. Richard Schmidt wil ik bedanken voor het feit dat hij geheel belangeloos de rol van opdrachtgever en bedrijfsbegeleider op zich heeft genomen en de daarbij horende kritische blik op de opgeleverde documenten. Richard Arends wil ik bedanken voor het aanleveren van de Pagent handleiding, zonder deze handleiding waren de testen nooit binnen zo'n korte tijd geslaagd. Ten slotte wil ik mijn vriendin Renske bedanken, zonder haar steun was het niet mogelijk geweest om het afstuderen naast mijn werk in 17 weken af te ronden.

Samenvatting

Dit rapport beschrijft een onderzoek naar de mogelijkheden van MPLS Traffic Engineering technieken. Dat zijn technieken waarmee de route die een datapakketje door een MPLS netwerk volgt, beïnvloed kan worden. Zonder deze technieken volgt al het dataverkeer de route die het routing protocol bepaalt, wat normaal gesproken overeenkomt met de kortste route. Met deze technieken is het mogelijk om het dataverkeer een andere route dan de kortste te laten nemen. Dit onderzoek gaat in op de mogelijkheden die deze technieken bieden om een netwerk met standaard routering effectiever te benutten.

Zowel uit een literatuurstudie als uit praktijktesten blijkt dat een effectievere benutting inderdaad mogelijk is. De grootste winst in effectieve benutting is te realiseren door het aanbrengen van MPLS Traffic Engineering Load sharing tunnels over verschillende routes van A naar B met een ongelijke cost. Door het aanbrengen van de tunnels wordt het mogelijk om alle beschikbare capaciteit van A naar B te benutten, terwijl in het netwerk met standaard routering alleen de beschikbare capaciteit van de snelste route wordt benut. Ook op het gebied van Quality of Service kan een netwerk met standaard routering effectiever benut worden. Door het aanbrengen van DiffServ Traffic Engineering tunnels kan het percentage dataverkeer met een hoge prioriteit (bijv. voice verkeer) op elke verbinding in het netwerk beperkt gehouden worden. Hierdoor kan al het voice verkeer met een lage delay verstuurd worden en blijft de totale delay die het voice verkeer oploopt gegarandeerd laag. In een MPLS netwerk met standaard routering is het niet mogelijk om het percentage voice verkeer te beheersen. Daardoor kan niet gegarandeerd worden dat het voice verkeer op elke verbinding met een lage delay wordt verstuurd, waardoor ook geen lage totale delay gegarandeerd kan worden. De laatste manier waarop een MPLS netwerk met standaard routering effectiever benut kan worden is door de inzet van MPLS Traffic Engineering Recovery en Protection technieken. Daarbij wordt een normale MPLS Traffic Engineering tunnel beschermd door preventief aangebrachte backup tunnels. Deze backup tunnels kunnen het dataverkeer razendsnel (binnen ca. 50 ms) omleiden in het geval dat er een verbinding of een router op de route van de normale tunnel uitvalt. Hierdoor gaat er dus maximaal 50 ms aan data verloren. In een netwerk met standaard routering gaan alle routers na het uitvallen van een verbinding of router eerst informatie uitwisselen. Met deze informatie gaan de routers vervolgens op basis van de nieuwe situatie een nieuwe route naar alle bestemmingen in het netwerk berekenen. Afhankelijk van de grootte van het netwerk (aantal routers en aantal subnetwerken) kost dit 1 tot 10 seconden. Hierdoor gaat er dus 1 tot 10 seconden aan data verloren, wat beduidend meer is dan de 50 ms in de situatie met MPLS Traffic Engineering.

Voor drie netwerken is bepaald wat in theorie de totale effectieve benutting van dat netwerk is met en zonder MPLS Traffic Engineering technieken. Van netwerken is de effectieve benutting met en zonder MPLS Traffic Engineering ook in de praktijk gemeten. Uit de resultaten blijkt dat de verschillende MPLS Traffic Engineering technieken in de praktijk inderdaad voor een effectievere benutting van een MPLS netwerk met standaard routering zorgen. De gemeten effectieve benuttingen komen in grote lijnen overeen met de theoretische voorbeelden. Er werden weliswaar afwijkingen gevonden, maar deze waren verklaarbaar.

Inhoudsopgave Pagina

1. Inleiding

Dit rapport beschrijft een onderzoek naar de mogelijkheden van MPLS Traffic Engineering technieken. Dat zijn technieken waarmee de route die een datapakketje door een MPLS netwerk volgt, beïnvloed kan worden. Zonder deze technieken volgt al het dataverkeer de route die het routing protocol bepaalt, wat normaal gesproken overeenkomt met de kortste route. Met deze technieken is het mogelijk om het dataverkeer een andere route dan de kortste te laten nemen. Dit onderzoek gaat in op de mogelijkheden van die technieken en dan met name op de mogelijkheden die deze technieken bieden om een netwerk met standaard routering effectiever te benutten. Daarbij is zowel voor een theoretische benadering door middel van een literatuurstudie als voor een praktische benadering in de vorm van een 'Proof of Concept' gekozen. Bij het Proof of Concept gedeelte is middels praktijktesten onderzocht of een testnetwerk met MPLS Traffic Engineering technieken inderdaad effectiever benut wordt dan zonder die technieken. De probleemstelling die ten grondslag ligt aan dit onderzoek wordt hierna beschreven.

Probleemstelling

Hoofdvraag: Hoe kunnen Traffic Engineering technieken worden ingezet voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?

Om tot een antwoord op deze vraag te komen, zullen de onderstaande deelvragen beantwoord moeten worden:

1. Wat is een MPLS netwerk?
2. Wat is Traffic Engineering?
3. Welke MPLS Traffic Engineering technieken zijn er?
4. Welke mogelijkheden bieden de MPLS Traffic Engineering technieken?
5. Welke criteria bepalen de effectiviteit van de benutting van een (MPLS) netwerk?
6. Hoe effectief wordt een MPLS netwerk zonder Traffic Engineering technieken benut?
7. Hoe zouden de gevonden Traffic Engineering technieken bij kunnen dragen aan het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?
8. Hoe zou het effectiever benutten van het netwerk door toepassing van deze technieken in de praktijk getest kunnen worden?
9. Welk netwerk is nodig voor zo'n praktijktest?
10. Zorgen deze technieken in de praktijk inderdaad voor een effectievere benutting van het netwerk?

Hoofdstuk 2 beschrijft de globale werking van een MPLS netwerk. Hoofdstuk 3 gaat in op het begrip Traffic Engineering. In hoofdstuk 4 worden de MPLS Traffic Engineering technieken kort beschreven. Hoofdstuk 5 behandelt de manier waarop een MPLS Traffic Engineering tunnel opgezet kan worden. Aan de hand van voorbeeld netwerken worden de mogelijkheden van MPLS Traffic Engineering technieken uiteengezet in hoofdstuk 6. In hoofdstuk 7 worden criteria opgesteld waarmee de effectieve benutting van een netwerk bepaald kan worden. In hoofdstuk 8 wordt de effectieve benutting van de voorbeeld netwerk met en zonder MPLS Traffic Engineering technieken bepaald. Hoofd 9 beschrijft de uitgevoerde praktijktesten. Hoofdstuk 10 bevat de conclusie en de aanbevelingen voor vervolgonderzoek.

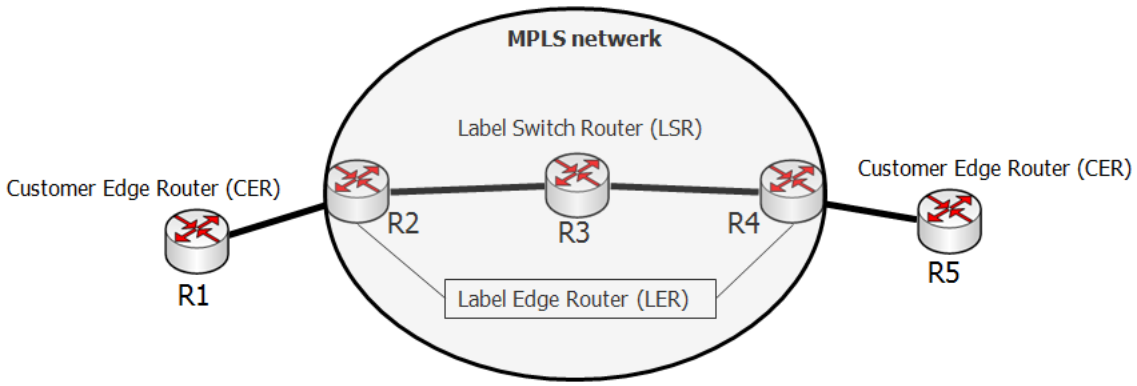
2. Multi Protocol Label Switching

Dit onderzoek gaat over het toepassen van Traffic Engineering (TE) technieken in MPLS netwerken. Over Multi Protocol Label Switching (MPLS) netwerken zijn vele boeken volgeschreven, terwijl dit rapport slechts één hoofdstuk over MPLS bevat. Het is dan ook niet de bedoeling van dit hoofdstuk om een compleet beeld van MPLS en al haar mogelijkheden te schetsen. Dit hoofdstuk gaat in op de globale werking van een MPLS netwerk. Het behandelt de concepten en begrippen van MPLS die nodig zijn voor het begrijpen van de rest van dit onderzoek.

Dit hoofdstuk begint met een voorbeeld waarbij verteld wordt hoe een datapakket door een MPLS netwerk gestuurd wordt. Daarna wordt dieper ingegaan op de het MPLS label, het forwarden van datapakketjes en de label distributie binnen een MPLS netwerk.

2.1 Een voorbeeld MPLS netwerk

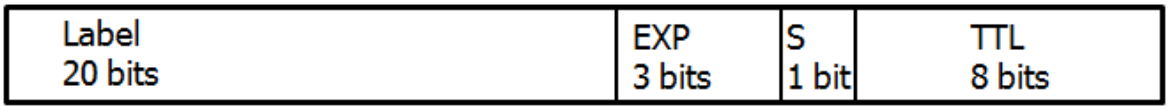
In figuur 1 is een voorbeeld van een MPLS netwerk weergegeven. Routers aan de rand van een MPLS netwerk heten Label Edge Routers (LER). De overige routers in een MPLS netwerk heten Label Switch Routers (LSR). Klantrouters die verbonden zijn met een MPLS netwerk heten Customer Edge Router (CER).



Figuur 1. Een voorbeeld van een MPLS netwerk

Stel er wordt een datapakketje verstuurd van router R1 naar R5. Wanneer dit pakketje binnenkomt op R2 wordt het pakketje voorzien van een label en doorgestuurd naar R3. R3 kijkt vervolgens alleen naar het label dat R2 heeft toegevoegd. Op basis van het door R2 toegevoegde label weet R3 waar het pakketje naar toe moet. R3 vervangt het label en stuurt het door naar R4. R4 verwijdert het label en stuurt het pakket door naar R5. Uiteraard is met deze korte uitleg nog steeds niet duidelijk hoe een MPLS netwerk echt werkt. Het gaat vooral om het globale idee dat datapakketjes binnen een MPLS netwerk geswitcht worden op basis van labels. Hierna wordt antwoord gegeven op vragen als: "Hoe ziet zo'n label er uit?", "Hoe weet R2 nou welk label er op het pakketje moet?", "Hoe weet R3 waar het pakketje naar doorgestuurd moet worden?" en "Hoe komen de routers aan deze informatie?".

2.2 Het MPLS Label



Figuur 2. Schematische weergave van een MPLS label.

Het MPLS label bevat 32 bits en bestaat uit de volgende vier onderdelen:

- label: 20 bits waarde waarmee de labels van elkaar onderscheiden worden;
- EXP: 3 bits waarde, die meestal gebruikt wordt voor Quality of Service toepassingen;
- S: 1bit om aan te geven of dit label het onderste label van de stack is (bij meerdere labels op één pakketje);
- TTL: 8 bits Time to Live waarde, meestal gelijk aan de TTL van het onderliggende IP packet.

MPLS kan opereren in 'frame mode' en 'cell mode'. In cell mode wordt het MPLS label opgenomen in de ATM cell header, in frame mode wordt het MPLS label tussen de headers van OSI-laag 2 en 3 gevoegd. In dit onderzoek wordt alleen MPLS in frame mode behandeld. In Osborne & Simha (2002, p.26) wordt namelijk aangegeven dat MPLS Traffic Engineering niet mogelijk is in MPLS cell mode. Figuur 3 geeft het MPLS label in frame mode weer.

Figuur 3. Een of meerdere MPLS labels worden tussen de headers van OSI laag 2 en 3 gevoegd.

Het Label Switching deel van de naam MPLS komt van het switchen van packets op basis van een label, zoals in hoofdstuk 2.1 toegelicht. Het deel Multi Protocol slaat op de verschillende data-link-layer (OSI laag 2) en network layer (OSI laag 3) protocollen waarmee MPLS samen kan werken. Zoals in figuur 3 aangegeven werkt MPLS met data-link-layer protocollen Ethernet en PPP, maar ook met de bij Service Providers veelgebruikte protocollen als Frame Relay en ATM. Dit alles maakt MPLS zeer flexibel in de implementatie.

Label acties

Het toevoegen van een label, zoals dat in het voorbeeld in hoofdstuk 2.1 gebeurt op de Label Edge Router (LER) R2 heet label pushing. Het vervangen van het ene label door een ander label heet label swapping (in het voorbeeld op Label Switch Router (LSR) R3). Het verwijderen van een label heet label popping (in het voorbeeld op LER R4).

2.3 Packets forwarden

Het forwarden (doorsturen) van packets in een MPLS netwerk gebeurt aan de hand van de FIB, de LIB en de LFIB. De FIB, LIB en LFIB zijn allemaal in het cache geheugen (het snel toegankelijke geheugen) van de router geladen. Hierna wordt uitgelegd wat de functie van de FIB, de LIB en de LFIB is.

Forwarding Information Base (FIB)

De FIB is vergelijkbaar met een normale routing table, maar dan in het cache geheugen van de router geladen. De FIB kan hierdoor sneller geraadpleegd worden dan een normale routing table. De FIB wordt alleen geraadpleegd door LER (in het voorbeeld van hoofdstuk 2.1 door LER R2). De FIB bevat naast de uitgaande interface ook het label dat gepusht moet worden.

Label Information Base (LIB)

De LIB bevat alle label bindings van de router zelf en van de aangrenzende routers. Een label binding is een netwerk adres met het daarbij behorende label. Stel dat router R3 uit figuur 1 een route voor netwerk 20.0.0.0 in de routing table heeft staan. Dan bevat de LIB het label dat R3 zelf hanteert voor netwerk 20.0.0.0, maar ook de labels die R2 en R4 hanteren voor dat netwerk. Hoe router R3 aan de labels van R2 en R4 komt, wordt uitgelegd in hoofdstuk 2.4.

Label Forwarding Information Base (LFIB)

De LFIB bevat alle labels die binnen kunnen komen met bijbehorende interface en de uitgaande labels met de bijbehorende interface. Een voorbeeld van één LFIB-entry op router R3: als label 113 binnenkomt op interface s0/1 wordt het label geswapt naar label 245 en doorgestuurd via interface s0/2. De LFIB wordt alleen gebruikt op alle LSR. De LFIB wordt samengesteld aan de hand van de informatie in de LIB.

2.4 Label distributie

Er zijn drie label distributie protocollen mogelijk in een MPLS netwerk, te weten Tag Distribution Protocol (TDP), Label Distribution Protocol (LDP) en Resource Reservation Protocol (RSVP). TDP is Cisco proprietary en werkt dus alleen maar tussen twee Cisco routers. Omdat TDP verder op eenzelfde manier als LDP werkt, wordt TDP verder niet uitgelegd. RSVP wordt alleen gebruikt voor Traffic Engineering toepassingen, de werking wordt uitgelegd in hoofdstuk 5. De werking van LDP wordt hieronder beschreven.

Label Distribution Protocol

Nadat het routing protocol in het netwerk geconvergeerd is, gaat LDP informatie uitwisselen. LDP werkt op basis van 'neighbor relationship', wat inhoudt dat alleen aangrenzende routers labelinformatie delen. De routers wisselen informatie uit over de netwerken die zij kunnen bereiken en de labels die zij daarvoor gebruiken. In het voorbeeld uit hoofdstuk 2.1 wisselen R2 en R3 de genoemde informatie uit, evenals routers R3 en R4. Deze informatie wordt in de LIB opgeslagen, op basis waarvan vervolgens de FIB en LFIB worden samengesteld. Nadat de FIB, LIB en de LFIB zijn samengesteld weet elke router welk label er gepusht, geswapt of gepopt moet worden.

3. Traffic Engineering

Om te begrijpen welke MPLS Traffic Engineering technieken gebruikt kunnen worden voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk, dient eerst duidelijk te zijn wat Traffic Engineering eigenlijk is. Dit hoofdstuk gaat daarom in op het begrip Traffic Engineering.

In Osborne & Simha (2002, p.6) wordt dit uitgelegd aan de hand van de begrippen 'network engineering' en 'Traffic Engineering'. Network engineering is daarbij het aanpassen van het netwerk om ervoor te zorgen dat het netwerk zo goed mogelijk past bij het verkeer dat er overheen moet. Hierbij wordt eerst een inschatting gemaakt van het te verwachten dataverkeer. Waarna een netwerk wordt ontworpen en gebouwd dat zo goed mogelijk in staat is om het te verwachten dataverkeer te transporteren. Bij network engineering is het dus belangrijk welke routers, switches en bandbreedte er nodig zijn om het te verwachten dataverkeer af te handelen. Omdat het veel tijd kost om nieuwe routers, switches en verbindingen aan te leggen, is netwerk engineering iets voor de lange(re) termijn (weken, maanden of jaren).
Traffic Engineering daarentegen is het manipuleren van het dataverkeer om ervoor te zorgen dat het zo goed mogelijk aansluit bij het netwerk. Hoe goed de inschatting van het te verwachten dataverkeer ook is, er zijn altijd situaties waarin de voorspelling niet klopt. Dit komt bijvoorbeeld doordat een website ineens heel populair is of doordat een verbinding of router plotseling uitvalt. Deze onverwachte gebeurtenissen leiden er meestal toe dat er één verbinding overbelast wordt, terwijl andere verbindingen gedeeltelijk ongebruikt blijven. Dit laatste komt omdat routing protocollen standaard al het dataverkeer over de kortste route sturen (meer uitleg hierover in hoofdstuk 5). De kern van Traffic Engineering is dus het verleggen van dataverkeer van overbelaste verbindingen naar (gedeeltelijk) ongebruikte verbindingen. Benadrukt wordt dat Traffic Engineering iets is dat ook met andere protocollen dan MPLS mogelijk is.

Een analogie met het wegverkeer maakt het nog duidelijker. In dat geval is 'network engineering' bijvoorbeeld het aanleggen van alle snelwegen en provinciale wegen in Nederland. Waar veel verkeer wordt verwacht, wordt een 4-baanssnelweg aangelegd, waar minder verkeer wordt verwacht een 2-baanssnelweg of provinciale weg. Traffic Engineering is dan het 'sturen' van het verkeer door file-informatie op de radio, internet of matrixborden. 'Verkeer van Rotterdam naar Amsterdam wordt geadviseerd om te rijden via Utrecht, omdat er bij Den Haag 20 km file staat'.

Volgens Davie & Farrel (2008, p.67-68) draait het bij Traffic Engineering allemaal om het ontdekken van andere routes (dan de kortste) en het monitoren van het huidige gebruik van het netwerk, om vervolgens het verkeer over die andere routes te sturen om optimaal gebruik te maken van de resources van het netwerk. In Minei & Lucek (2005, p.37) wordt Traffic Engineering heel kort omschreven als het beheersen van de route die dataverkeer door het netwerk neemt. Met als voornaamste doel het optimaliseren van het gebruik van de resources van het netwerk.

Met deze drie vergelijkbare beschrijvingen is een goed beeld ontstaan van het begrip Traffic Engineering. Daarmee is de tweede deelvraag beantwoord.

4. MPLS Traffic Engineering technieken

Een van de stappen op weg naar het antwoord op de hoofdvraag is het beantwoorden van deelvraag 3: Welke MPLS Traffic Engineering technieken zijn er? Dit hoofdstuk geeft antwoord op die vraag en geeft een beknopte omschrijving van de technieken.

Alle MPLS Traffic Engineering technieken zijn gebaseerd op het gebruik van tunnels (informatie over het configureren van tunnels is te vinden in hoofdstuk 5). Zonder het creëren van tunnels kunnen de MPLS Traffic Engineering technieken dus niet worden toegepast. De toepassingsdoeleinden van de technieken zijn op te delen in drie categorieën, toepassing voor:

- Load sharing;
- Quality of Service (QoS);
- Recovery en Protection;

Load sharing

Bij load sharing wordt het dataverkeer (load) verdeeld (sharing) over meerdere verbindingen. Zoals in hoofdstuk 3 uitgelegd, is de kern van Traffic Engineering het verleggen van een deel van de load van een overbelaste verbinding naar één of meerdere (gedeeltelijk) ongebruikte verbindingen. Het hoofddoel van het creëren van tunnels is dan ook load sharing. In Osborne & Simha (2002, H5) wordt een aantal mogelijke load sharing situaties beschreven. Vergelijkbare situaties worden gevonden in Davie & Farrel (2008, H5.1 t/m 5.5) en Minei & Lucek (2005, H2), al hanteren deze boeken niet de term load sharing.

Quality of Service

QoS is een verzameling van technieken. Deze technieken hebben als doel om binnen een netwerk een aantal verschillende service niveaus te kunnen leveren. Het service niveau hangt daarbij af van de prioriteit van het dataverkeer. Datapakketjes met een hoge prioriteit krijgen een hoog service niveau, pakketjes met een lage prioriteit een laag service niveau. Een hoge prioriteit geldt bijvoorbeeld voor voice data, telefoongesprekken zijn immers zeer gevoelig voor delay (vertraging). Mail dataverkeer daarentegen is niet gevoelig voor delay en krijgt meestal een lagere prioriteit. Het is mogelijk om een deel van de bandbreedte van een verbinding speciaal te reserveren voor tunnels die verkeer met een hoge prioriteit vervoeren. Dit zorgt ervoor dat er op één verbinding nooit te veel delay gevoelig verkeer terecht komt. Hierdoor kan al het voice verkeer met voorrang en dus met een lage delay over de verbinding verstuurd worden. De toepassing van MPLS Traffic Engineering ten behoeven van QoS wordt behandeld in Osborne & Simha (H6), Davie & Farrel (H6) en Minei & Lucek (H4).

Recovery en Protection

Een tunnel loopt over een aantal verbindingen en routers (zie uitleg in hoofdstuk 5). Het kan natuurlijk gebeuren dat één van de verbindingen of routers uitvalt. Voor die gevallen zijn er recovery (herstel) en protection (bescherming) technieken. Deze technieken kunnen de tunnel snel om de uitgevallen verbinding of router heen leiden. Recovery en protection technieken worden beschreven in Osborne & Simha (H7), Davie & Farrel (H7) en Minei & Lucek (H3).

5. Configureren van een MPLS Traffic Engineering tunnel

Zoals aangegeven in hoofdstuk 4 zijn alle MPLS Traffic Engineering technieken gebaseerd op het gebruik van tunnels. Dit hoofdstuk gaat in op het configureren van tunnels. Een tunnel is een route van begin naar eindpunt, waarbij tussen begin- en eindpunt één of meerdere verbindingen en routers liggen. In het voorbeeld van hoofdstuk 2.1 zou er bijvoorbeeld een tunnel van R2 naar R4 kunnen lopen. Hierna wordt eerst uitgelegd hoe de route van begin naar eindpunt wordt bepaald en op welke wijze de route beïnvloed kan worden. Daarna wordt ingegaan op RSVP het protocol dat gebruikt wordt om de route vast te leggen. Ten slotte wordt beschreven hoe verkeer kan worden toegewezen aan de gemaakte tunnels.

De route van de tunnel

Voor het berekenen van de route van het beginpunt naar het eindpunt maakt MPLS Traffic Engineering gebruik van Constrained Shortest Path First (CSPF). CSPF is een variant op SPF dat door de routing protocollen OSPF en IS-IS wordt gebruikt. SPF bepaalt vanaf één router de kortste route naar alle andere routers in het netwerk. Elke verbinding in het netwerk heeft een bepaalde cost (ook wel 'metric' genaamd), normaal gesproken wordt de cost gebruikt als maat voor de snelheid van die verbinding. Een snelle verbinding krijgt een lage cost, een langzame een hoge cost. De cost van alle verbindingen tussen het beginpunt en het eindpunt worden opgeteld, de kortste route is de route met de laagste totale cost.

CSPF verschilt in een aantal opzichten van SPF. CSPF berekent alleen de route naar de router die het eindpunt van de tunnel vormt en niet naar alle andere routers in het netwerk. CSPF kijkt naast de cost ook naar de beschikbare bandbreedte, de administrative weight en de link attributes bij het bepalen van de route. CSPF verkrijgt al deze gegevens via het routing protocol OSPF of IS-IS. Alle OSPF routers in een netwerk wisselen gegevens uit over alle routers en verbindingen in het netwerk. Met deze gegevens kunnen de routers vervolgens de kortste route naar alle andere routers bepalen via het SPF algoritme. De gegevens die uitgewisseld worden zijn uitgebreid met de beschikbare bandbreedte, de administrative weight en de link attributes teneinde ook een CSPF berekening mogelijk te maken. Dit zelfde geldt ook voor IS-IS routers. CSPF kan hierdoor alleen in combinatie met OSPF of IS-IS worden gebruikt.

De beschikbare bandbreedte moet groter zijn dan de bandbreedte die de tunnel nodig heeft (zie uitleg RSVP later dit hoofdstuk). De administrative weight kan door de netwerkbeheerder op elke verbinding worden ingesteld, bijvoorbeeld om de delay van de verbinding aan te geven. CSPF kan dan voor een tunnel met voice dataverkeer een route zoeken met een lage delay. De link attributes is een 32 bits waarde welke de netwerkbeheerder kan gebruiken om 32 zelf gekozen eigenschappen van de verbinding aan te geven. Bij het configureren van de tunnel kan vervolgens aangegeven worden of de route van de tunnel wel of niet aan deze eigenschappen moet voldoen.

Bij het configureren van een tunnel zijn er nog een aantal opties die invloed hebben op de route van de tunnel. Met de exclude address optie is het mogelijk om een verbinding of een router uit te sluiten van de route. Met de explicit route optie kan de netwerkbeheerder zelf de gehele route

opgeven, er vindt dan geen CSPF berekening meer plaats. Middels de path-option optie is het mogelijk om meerdere routes op te geven en een prioriteit op basis waarvan de routes gebruikt worden. De laatste twee eigenschappen die opgegeven worden bij de tunnelconfiguratie zijn de setup- en de hold priority. Voor beiden geldt hoe lager hoe beter. Als de setup priority van een nieuwe tunnel lager is dan de hold priority van een reeds bestaande tunnel, kan de bestaande tunnel worden verwijderd. Dit verschijnsel heet pre-emption.

Nadat een tunnel in gebruik is genomen, kan het voorkomen dat er een betere route ontstaat. Bijvoorbeeld omdat er een nieuwe verbinding wordt aangelegd. Hiervoor is de reoptimization timer in het leven geroepen. De timer is instelbaar, zodra de timer is afgelopen kijkt CSPF of er een betere route beschikbaar is. Reoptimization kan ook handmatig of event-driven worden geactiveerd. Bij event-driven vindt reoptimazation direct plaats als er bijvoorbeeld een verbinding 'up' komt. Het is ook mogelijk om bij de configuratie van de tunnel aan te geven dat er nooit reoptimization plaats moet vinden.

RSVP

Zodra de route voor de tunnel berekend is, dient er voor de gehele route van de tunnel bandbreedte gereserveerd te worden. Dat gebeurt door middel van het Resource Reservation Protocol (RSVP). De werking van RSVP wordt uitgelegd aan de hand van een tunnel met een bandbreedte van 100 kbps tussen R2 en R4 in figuur 1. De reservering loopt van het beginpunt via alle tussenliggende routers naar het eindpunt en terug. R2 begint met een bericht naar R3 met het verzoek 100 kbps te reserveren. R3 kijkt of de bandbreedte beschikbaar is, zo ja wordt het verzoek doorgestuurd naar R4. R4 kijkt ook of de bandbreedte beschikbaar is, zo ja, wordt een bevestiging van de reservering naar R3 teruggestuurd. Bij deze bevestiging zit tevens het label dat R4 van R3 wil ontvangen voor deze route. R3 stuurt zo'n zelfde bevestiging naar R2, met daarbij ook het label dat R3 van R2 wil ontvangen voor deze route. Als R2 de bevestiging ontvangt is de tunnel vastgelegd.

Naast mechanismen om tunnels te creëren, zijn er ook mechanismen om tunnels weer op te heffen en mechanismen om tunnelroutes periodiek te controleren. De gereserveerde bandbreedte kan eveneens periodiek (automatisch) worden aangepast. Daarbij wordt eens in de zoveel tijd (instelbaar) gekeken of de bandbreedte die de tunnel gebruikt hoger of lager is dan de gereserveerde bandbreedte.

Forwarding traffic down tunnels

Nadat een tunnel is gecreëerd, dient ervoor gezorgd te worden dat het dataverkeer ook daadwerkelijk gebruik gaat maken van de tunnel. Er zijn drie manier om dataverkeer aan een tunnel toe te wijzen. De eerste is op basis van 'static routes', daarbij wordt bijvoorbeeld al het dataverkeer met als bestemming ip adres 4.4.4.4 gebruik naar de interface van Tunnel1 gestuurd. De tweede manier is op basis van Policy Based Routing. Bij Policy Based Routing wordt al het verkeer met behulp van een 'access-list' al dan niet toegelaten tot de tunnel interface. Het verkeer dat conform de 'access-list' wel toegang krijgt tot de tunnel wordt doorgelaten, ander verkeer wordt geweigerd. De derde en meest eenvoudige manier is op basis van 'autoroute'. Door middel

van één commando *vertelt* de tunnel aan de router dat er een route is naar ip adres 4.4.4.4 (voorbeeld ip adres). Deze route wordt opgenomen in de normale routing table en kan vervolgens door al het verkeer gebruikt worden.

Het is belangrijk om te beseffen dat de hoeveelheid verkeer die aan een tunnel toegewezen wordt, onafhankelijk is van de door RSVP gereserveerde bandbreedte. Een voorbeeld: Er is een verbinding met een bandbreedte van 5 Gbps. Over die verbinding wordt een tunnel configureerd waarvoor 1 Gbps gereserveerd wordt. Vervolgens wordt er 2 Gbps naar de tunnel gestuurd. In dat geval zal de tunnel de 2 Gbps gewoon transporteren. De netwerkbeheerder dient er met behulp van andere technieken voor te zorgen dat er niet teveel verkeer in de tunnels terecht komt.

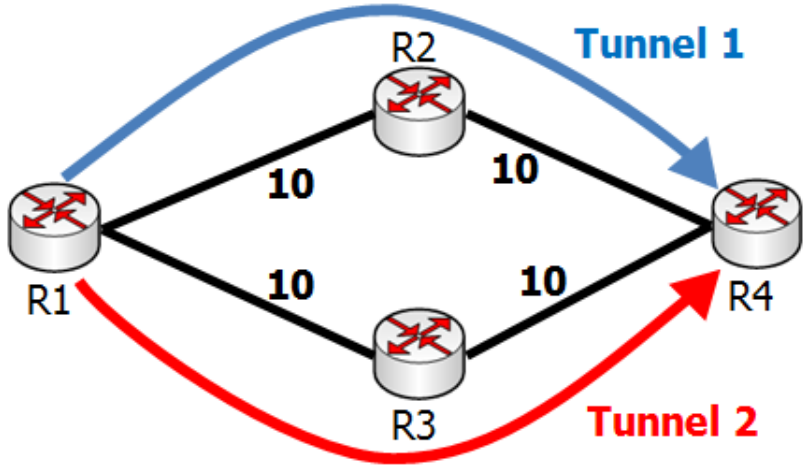
6. Mogelijkheden MPLS Traffic Engineering technieken

In hoofdstuk 4 zijn de MPLS Traffic Engineering technieken opgedeeld in drie toepassingsgebieden en is een beknopte uitleg gegeven over deze toepassingsdoeleinden. Dit hoofdstuk gaat dieper in op de mogelijkheden van de MPLS Traffic Engineering technieken. Ook nu worden de technieken besproken per toepassingsgebied. Alle gegeven voorbeeld netwerken zijn MPLS netwerken. Wanneer over een tunnel gesproken wordt, betreft dit een MPLS Traffic Engineering tunnel.

6.1 Load sharing

Er zijn twee soorten load sharing, equal cost load sharing en unequal cost load sharing. Beide typen load sharing worden hierna uitgelegd.

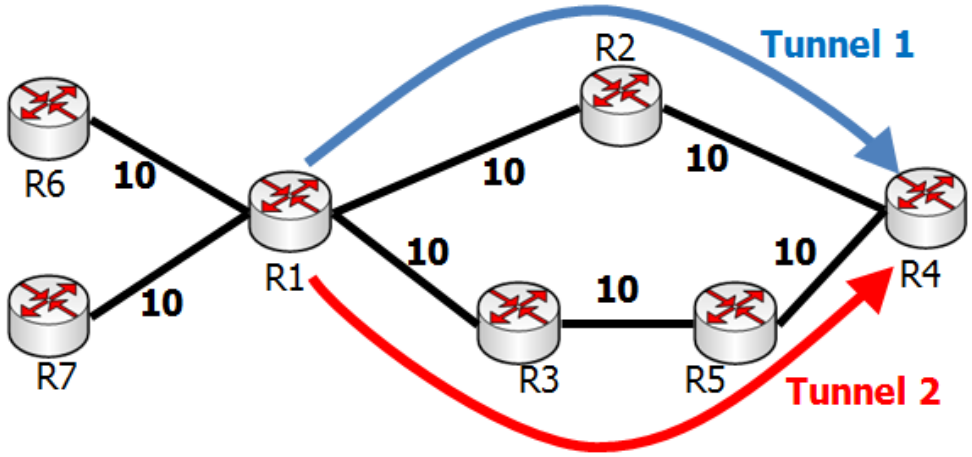
Equal cost load sharing



Figuur 4. Voorbeeld equal cost load sharing tussen tunnel 1 (blauw) en tunnel 2 (rood).

In figuur 4 wordt een voorbeeld van equal cost load balancing weergegeven. De zwarte getallen geven de cost (metric) van de verbindingen aan, alle verbindingen hebben een cost van 10. Zowel tunnel 1 (R1→R2→R4) als tunnel 2 (R1→R3→R4) hebben een totale cost van 20 (10+10). Door twee tunnels te configureren, kan het dataverkeer evenredig worden verdeeld over de twee routes van R1 naar R4. De meeste routing protocollen (bv. OSPF, RIP, IS-IS en EIGRP) zullen het dataverkeer overigens automatisch verdelen (bij routing protocollen wordt dit meestal load balancing genoemd) en hebben daar geen MPLS Traffic Engineering tunnels voor nodig. Toch bieden de tunnels extra flexibiliteit in het sturen van het dataverkeer. Als de verbinding tussen R1 en R2 bv. een hoge delay heeft, kan hier bij het bepalen van de tunnel rekening mee gehouden worden (uitleg in hoofdstuk 5). Voice verkeer kan dan de rode tunnel gebruiken en delay ongevoelig verkeer de blauwe tunnel. De meeste routing protocollen houden geen rekening met delay bij het bepalen van de metric (EIGRP doet dit wel).

Unequal cost load sharing



Figuur 5. Voorbeeld unequal cost load sharing tussen tunnel 1 (blauw) en tunnel 2 (rood).

Figuur 5 laat een voorbeeld van unequal cost load sharing zien, de zwarte getallen geven opnieuw de cost aan. De blauwe tunnel 1 loopt van R1→R2→R4 en heeft een totale cost van 20. De rode tunnel 2 loopt van R1→R3→R5→R4 en heeft een totale cost van 30. Net als bij het voorbeeld van equal cost load sharing, kan ook nu het dataverkeer verdeeld worden over de twee tunnels van R1 naar R4. Bij het configureren van de tunnels kan ervoor worden gekozen om het dataverkeer evenredig te verdelen of in verhouding tot bijvoorbeeld de cost. In dat laatste geval gaat er minder dataverkeer door tunnel 2, omdat de cost van de tunnel hoger is en de route ongunstiger.

Een vergelijking met de situatie zonder tunnels laat de ware kracht van MPLS Traffic Engineering zien. Een routing protocol stuurt normaal gesproken namelijk al het dataverkeer over de route met de laagste cost, in dit geval R1→R2→R4. Stel dat alle verbindingen eenzelfde snelheid van 100 Mbps hebben. Als R6 en R7 beiden data met 100 Mbps versturen naar R4, komt er bij R1 data met een snelheid van 200 Mbps aan. Deze data moet verstuurd worden van R1 naar R4. R1 stuurt alle data echter naar de route met de laagste cost. R1 stuurt dus 200 Mbps naar een verbinding met een snelheid van slechts 100 Mbps. Hierdoor zal 100 Mbps verloren gaan, of op z'n minst opnieuw verstuurd moeten worden. Samenvattend kan met MPLS Traffic Engineering 200 Mbps verstuurd worden, terwijl zonder MPLS Traffic Engineering slechts 100 Mbps verstuurd kan worden en er bovendien 100 Mbps verloren gaat.

In de situatie zonder MPLS Traffic Engineering kan door een trucje hetzelfde effect bereikt worden als de situatie met MPLS Traffic Engineering. Dit kan door de cost van de verbindingen tussen 'R1 en R2' en 'R2 en R4' handmatig te veranderen in 15. Daarmee wordt de totale cost van beide routes (R1→R2→R4 en R1→R3→R5→R4) gelijk aan 30. Bij een gelijke cost zal het routing protocol load balancing toepassen. Het is echter (vrijwel) ondoenlijk om dit voor een netwerk van honderden routers handmatig in te stellen, laat staan te onderhouden. Naast dit trucje is bij gebruik van het routing protocol EIGRP ook een vorm van unequal cost load balancing mogelijk. Deze vorm van unequal cost load balancing is echter beperkt vanwege de kans op routing loops.

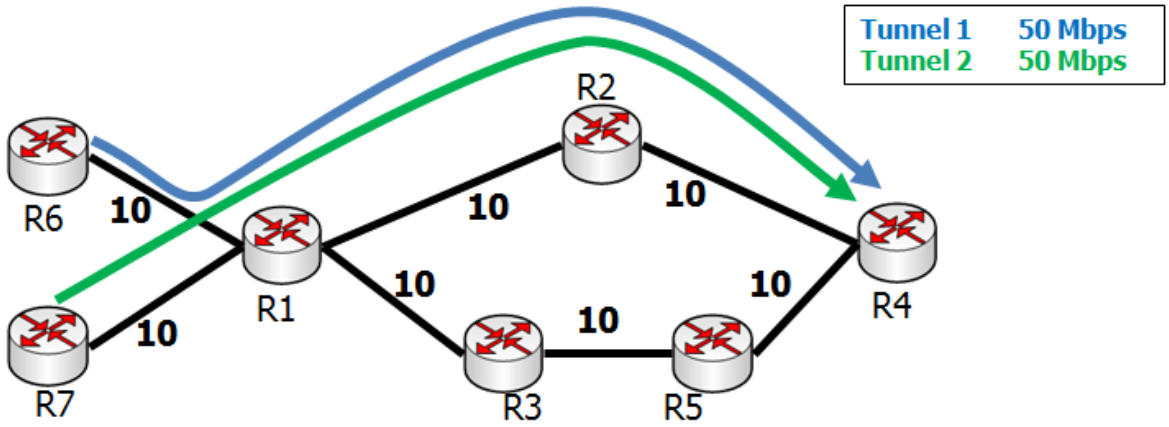
6.2 Quality of Service en MPLS Traffic Engineering

Zoals reeds in het onderzoeksplan (zie externe bijlage) genoemd, zijn QoS en MPLS Traffic Engineering twee compleet verschillende takken van sport, die zowel los van elkaar als naast elkaar kunnen worden gebruikt. Dit onderzoek richt zich op MPLS Traffic Engineering en gaat daarom alleen in op de combinatie van QoS en MPLS Traffic Engineering. Wel wordt een aantal QoS begrippen uitgelegd, omdat deze belangrijk zijn voor het begrijpen van dit onderzoek.

Belangrijke QoS begrippen

- *Differentiated Services (DiffServ)*: er zijn twee QoS modellen, Integrated Services en DiffServ. MPLS (Traffic Engineering) is ontworpen om samen te werken met het DiffServ model. Het doel van het DiffServ model is om onderscheid te kunnen maken in het service niveau dat verschillende typen dataverkeer ontvangen.
- *DiffServCodePoint (DSCP)*: één byte waarin het DiffServ model o.a. de prioriteit (3 bits) en de drop probability (3 bits) worden vastgelegd. Prioriteit wordt nader toegelicht bij het begrip Queuing, drop probability bij WRED.
- *Classification*: het indelen van netwerkverkeer in klassen met een verschillende prioriteit.
- *Marking*: het vastleggen/markeren van het prioriteitsniveau in bv. de IP- of MPLS-header.
- *Congestion*: als de datatoevoer groter is dan de capaciteit van de verbinding, ontstaat er een opstopping (congestion). Het teveel aan toegevoerde data wordt tijdelijk opgeslagen in een buffer. In de buffer wordt een rij (queue) van pakketjes gevormd. Zodra er ruimte is op de verbinding worden de pakketjes uit de buffer verzonden. **Belangrijk**: Queuing en WRED (zie uitleg hierna) treden alleen tijdens congestion in werking. Als er geen congestion is, wordt al het verkeer gewoon direct doorgestuurd.
- *Queuing*: het mechanisme dat tijdens congestion bepaalt hoe dataverkeer vanuit de bufferrij(en) toegelaten wordt op een verbinding. De belangrijkste queuing mechanismen zijn Class Based Weighted Fair Queuing (CBWFQ) en Low Latency Queuing (LLQ). CBWFQ verdeelt het dataverkeer op basis van de prioriteit in verschillende klassen, alle klassen krijgen een eigen rij (queue). Al deze klassen krijgen een gedeelte van de beschikbare bandbreedte toebedeeld, die bandbreedte is gegarandeerd. Welk type dataverkeer in welke klasse komt en hoeveel bandbreedte die klasse krijgt, is instelbaar. LLQ is CBWFQ met als uitbreiding één priority queue. Verkeer in de priority queue wordt altijd zeer snel verstuurd, waardoor een lage delay gegarandeerd is voor het verkeer in de priority queue.
- *Weighted Random Early Detection (WRED)*: als de bufferrijen tijdens congestion helemaal vol raken, moeten er datapakketjes gedropt (verwijderd) worden. Het mechanisme dat hiervoor gebruikt wordt, is WRED. WRED dropt meer pakketjes uit de queue met een lage prioriteit dan pakketjes uit de queue met een hoge prioriteit. Binnen één queue worden meer pakketjes met een hoge drop probability verwijderd, dan pakketjes met een lage drop probability.
- *Service Level Agreement (SLA)*: afspraak tussen de eigenaar en de gebruiker van het netwerk waarin het service niveau vastgelegd wordt dat door de eigenaar geleverd dient te worden. Een voorbeeld van een SLA: een Internet Service Provider (ISP) beloofd om al het voice dataverkeer van de klant gedurende minimaal 99,9% van de tijd met een gegarandeerd lage delay door het netwerk te transporteren.

DiffServ Traffic Engineering



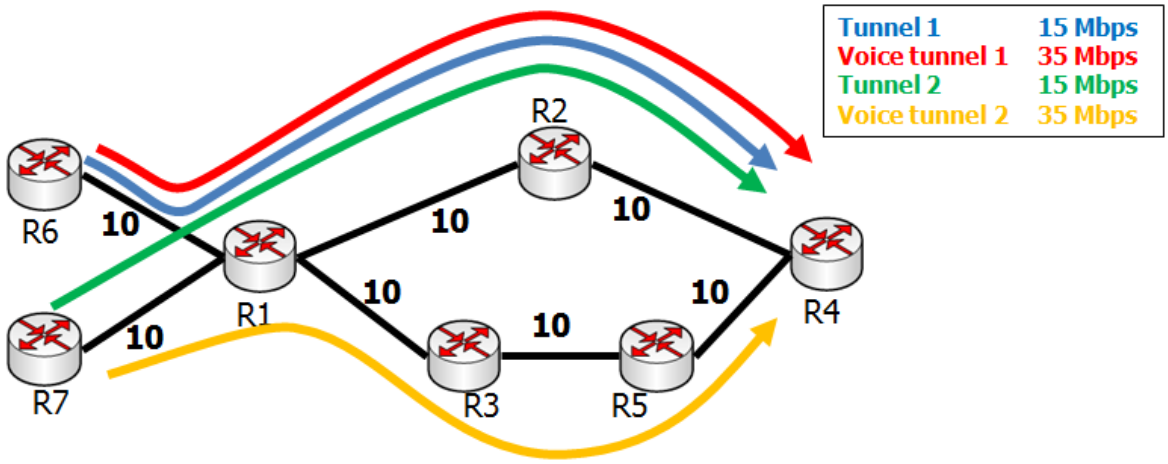
Figuur 6. Netwerk met twee 50 Mbps tunnels.

Figuur 6 geeft een netwerk weer, waarbij wordt aangenomen dat alle verbindingen 100 Mbps zijn. Er worden twee normale MPLS Traffic Engineering tunnels van 50 Mbps opgezet zoals in figuur 6 aangegeven. Beide tunnels kiezen automatisch (met behulp van CSPF) de kortste route en lopen dus via R1→R2→R4. Stel nu dat beide tunnels bestaan uit 35 Mbps voice dataverkeer en 15 Mbps mail dataverkeer. In dat geval kan er een probleem ontstaan op de verbinding tussen R1→R2 en tussen R2→R4. Dit heeft te maken met het maximale percentage delay gevoelig verkeer dat een verbinding aankan. In dit voorbeeld wordt voice verkeer als delay gevoelig verkeer gebruikt.

In Minei & Lucek (2005, p.114) wordt uitgelegd waarom dit percentage beperkt dient te worden. Dit heeft te maken met de totale delay die een voice pakketje mag oplopen van vertrek bij telefoon 1 tot de aankomst bij telefoon 2. De meest variabele factor in de totale delay is de queuing delay, de overige delays zijn meestal klein en redelijk constant. Queuing delay is de tijd dat het pakketje in de buffer zit, voordat het pakketje daadwerkelijk verzonden wordt (zie toelichting bij QoS begrip congestion). De queuing delay kan laag gehouden worden door ook de buffer van de priority queue klein te houden. Met een kleine buffer mag er niet al te veel verkeer tegelijk aankomen bij de priority queue. Wat opgelost wordt door slechts een beperkt percentage van de verbinding te gebruiken voor verkeer met een hoge prioriteit. Hoe groot een beperkt percentage precies is, wordt niet aangegeven.

Voor dit voorbeeld wordt aangenomen dat het percentage 50% is. Er mag dus maximaal 50% van de bandbreedte van een verbinding door voice verkeer gebruikt worden. In het genoemde voorbeeld ligt dit op 70%, er gaat immers 70 Mbps aan voice verkeer over een verbinding van 100 Mbps. Dit probleem kan opgelost worden door MPLS Traffic Engineering en DiffServ te combineren. De combinatie van DiffServ en Traffic Engineering wordt DS-TE genoemd. Opgemerkt wordt dat de hiervoor beschreven probleem situatie ook zonder het gebruik van MPLS Traffic Engineering tunnels ontstaat. In dat geval kiest ook al het verkeer de kortste route (via R1→R2→R4). Het gaat er in dit voorbeeld om dat 'normale' MPLS Traffic Engineering tunnels geen rekening houden met Quality of Service. Om dat probleem op te lossen is MPLS Traffic Engineering uitgebreid met DS-TE tunnels.

De totale beschikbare bandbreedte van een verbinding wordt bij DS-TE verdeeld in beschikbare bandbreedte voor specifieke prioriteitsklassen. Op alle verbindingen wordt bijvoorbeeld aangegeven dat 50% van de bandbreedte gereserveerd kan worden door verkeer met een hoge prioriteit (voice verkeer) en 50% door verkeer met een lage prioriteit. Wanneer een tunnel wordt opgezet, dient aangegeven te worden voor welke prioriteitsklassen bandbreedte gereserveerd moet worden. Figuur 7 laat hetzelfde netwerk zien als het vorige voorbeeld maar nu met DS-TE tunnels. Na de figuur wordt nader toegelicht hoe het opzetten van de tunnels werkt.



Figuur 7. Voorbeeld netwerk met DS-TE tunnels

Net als in het netwerk van figuur 7 moet er 50 Mbps van R6 naar R4 en eveneens 50 Mbps van R7 naar R4. Deze datastromen van 50 Mbps bestaan beiden uit 35 Mbps voice verkeer en 15 Mbps mailverkeer. Zoals gezegd is op alle verbindingen maximaal 50% van de bandbreedte te reserveren voor voice verkeer. De tunnels van R6 worden in dit voorbeeld als eerste opgezet, te beginnen met 'voice tunnel 1' (rood). Dit is een hoge prioriteit tunnel. Bij het opzetten ervan wordt dus een route bepaald (middels CSPF) waarbij verbindingen gebruikt worden waarop ten minste 35 Mbps gereserveerd kan worden voor verkeer met een hoge prioriteit. De kortste route die hieruit komt, is de rode route in figuur 7. De blauwe tunnel zoekt vervolgens een route waarop 15 Mbps vrij is voor verkeer met een lage prioriteit.
Daarna worden de tunnels van R7 naar R4 opgezet. Voor 'voice tunnel 2' (geel) wordt een route bepaald waarop nog ten minste 35 Mbps gereserveerd kan worden voor verkeer met een hoge prioriteit. Hoewel er op de verbindingen tussen R1→R2 en R2→R4 totaal nog wel 50 Mbps aan bandbreedte beschikbaar is, is er van deze 50 Mbps nog slechts 15 Mbps te reserveren voor voice verkeer. Er is immers op alle verbindingen 50 Mbps beschikbaar voor verkeer met een hoge prioriteit, waarvan reeds 35 Mbps gereserveerd is door 'voice tunnel 1'. De resterende 15 Mbps is niet voldoende voor 'voice tunnel 2'. Daarom loopt de uiteindelijke route van 'voice tunnel 2' via R1→R3→R5→R7. De groene tunnel zoekt ten slotte een route waarop ten minste 15 Mbps vrij is voor verkeer met een lage prioriteit. Dit resulteert in de groene route (figuur 7). Op deze wijze kan met DS-TE voorkomen worden dat het maximaal toelaatbare percentage voice verkeer op een verbinding wordt overschreden. Op die manier blijft ook de totale delay van het voice verkeer beperkt, wat weer belangrijk is voor de SLA's (zie toelichting QoS begrippen).

In Minei & Lucek (2005, p.114) wordt aangegeven dat het hiervoor beschreven probleem vroeger vaak werd opgelost door overdimensionering. Bij overdimensionering wordt veel minder verkeer op het netwerk toegelaten dan dat het netwerk eigenlijk kan transporteren. Op die manier wordt congestion voorkomen en treedt er ook geen queuing mechanisme in werking. Het percentage voice verkeer dat op een verbinding wordt toegelaten, wordt dan dus ook niet beperkt. Overdimensionering is natuurlijk niet ideaal omdat een (groot) gedeelte van de bandbreedte niet gebruikt wordt. Met DS-TE is overdimensionering dus niet meer nodig.

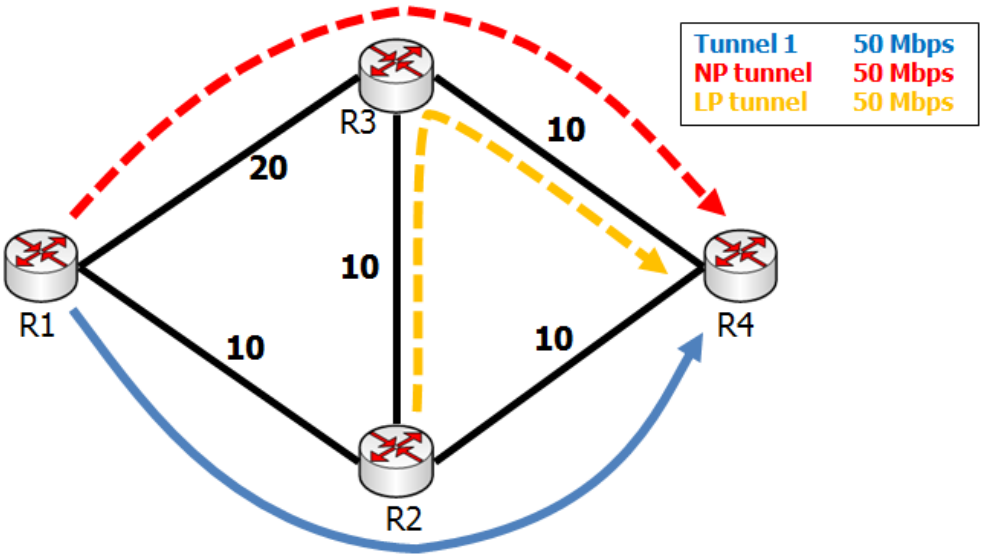
Zoals genoemd, wordt de totale beschikbare bandbreedte van een verbinding bij DS-TE verdeeld in beschikbare bandbreedte voor specifieke prioriteitsklassen. Voor verdelen van de beschikbare bandbreedte over de verschillende prioriteitsklassen zijn twee modellen beschikbaar. Het eerste is het Maximum Allocation Model (MAM), de tweede is het Russian Dolls Model (RDM). Verschil tussen MAM en RDM is dat bij MAM de gereserveerde bandbreedte niet gedeeld wordt tussen de prioriteitsklassen en bij RDM wel. Bij MAM wordt de beschikbare bandbreedte (100 Mbps) vooraf bijvoorbeeld verdeeld in 20Mbps voor hoge prioriteit en 80Mbps voor lage prioriteit. Als getracht wordt een tunnel op te zetten die 90 Mbps wil reserveren voor verkeer met een lage prioriteit wordt dit geweigerd, zelfs als de 20 Mbps voor verkeer met een hoge prioriteit op dat moment niet gebruikt wordt.

RDM laat het wel toe dat bandbreedte die eigenlijk gereserveerd is voor verkeer met een hoge prioriteit maar die niet in gebruik is, wordt gereserveerd door verkeer met een lage prioriteit. Indien op een later tijdstip de bandbreedte toch nodig is voor verkeer met een hoge prioriteit wordt de 90 Mbps tunnel gedwongen opgeheven. Om dit te bewerkstelligen wordt gebruik gemaakt van pre-emption (zie uitleg in hoofdstuk 5). De setup priority van de tunnel voor verkeer met een hoge prioriteit dient dan dus lager te zijn dan de hold priority van de tunnel voor verkeer met een lage prioriteit. Dit voorbeeld was met twee prioriteitsklassen, maar hetzelfde is eveneens mogelijk met drie of meer prioriteitsklassen.

In Osborne & Simha (2002, H6) worden de termen MAM en RDM niet gebruikt. Er wordt een model beschreven dat hetzelfde werkt als RDM met maximaal 2 prioriteitsklassen. Op www.cisco.com (d.d. 15 januari 2009) is gezocht naar 'mpls traffic engineering diffserv' voor een verklaring van dit verschil (het genoemde boek is van Cisco Press). Het eerste resultaat is een document waarin staat dat Cisco vroeger, voordat MAM en RDM bestonden, een eigen model had. Tegenwoordig worden MAM en RDM ook op Cisco routers ondersteund.

6.3 Recovery en protection

In hoofdstuk 4 werd reeds aangegeven dat het natuurlijk kan gebeuren dat één van de verbindingen of routers op de route van de tunnel uitvalt. Voor die gevallen zijn er recovery (herstel) en protection (bescherming) technieken. Deze technieken kunnen de tunnel snel om de uitgevallen verbinding of router heen leiden. Dit omleiden wordt Fast Reroute genoemd. Aan de hand van figuur 8 wordt uitgelegd hoe dit werkt.



Figuur 8. Netwerk met Link Protection (LP) en Node Protection (NP) tunnel

Tunnel 1 is een normale MPLS Traffic Engineering tunnel van 50 Mbps die loopt van R1→R2→R4. De vraag is wat er gebeurt als de verbinding tussen R2 en R4 uitvalt en wat er gebeurt als router R2 compleet uitvalt. In de situatie zonder MPLS Traffic Engineering worden alle routing beslissingen gemaakt door het routing protocol. Als een verbinding of router uitvalt, sturen de routers routing updates naar elkaar. Vervolgens wordt het SPF algoritme gestart totdat elke router weer de juiste en snelste routes naar alle andere routers heeft bepaald. In Osborne & Simha (2002, p.292) wordt aangegeven dat het in grote netwerken zo'n 5 à 10 seconden kan duren voordat alle routers weer over een goede routing tabel beschikken. Met een normale MPLS Traffic Engineering tunnel zal het zelfs nog iets langer duren voordat de tunnel weer over een bruikbare route beschikt. De tunnel moet namelijk na afloop van het SPF algoritme ook nog het CSPF algoritme starten om de nieuwe tunnelroute te bepalen. Voor sommige typen dataverkeer maakt het mogelijk niet uit dat er gedurende 5 à 10 seconden geen data verzonden wordt. Maar voor bijvoorbeeld voice verkeer is dit fataal. Zoals eerder genoemd mag een voice pakketje maximaal ongeveer 150 ms vertraging oplopen.

Speciaal voor dit soort situaties zijn de MPLS Traffic Engineering Fast Reroute tunnels. Voor het beschermen van een verbinding (ook wel link genaamd) kan een Link Protection tunnel worden aangebracht. Voor het beschermen van een router (ook wel node genaamd) kan een Node Protection tunnel worden aangebracht. Deze tunnels worden op dezelfde manier geconfigureerd als normale tunnels. Het is belangrijk te beseffen dat de tunnels vooraf worden opgezet en niet pas nadat een verbinding is uitgevallen. De tunnels worden dus op hetzelfde moment opgezet als de normale tunnel. In figuur 8 is de gele tunnel de Link Protection tunnel en de rode de Node Protection tunnel. Als de verbinding tussen R2 en R4 uitvalt, wordt het verkeer binnen 50 ms omgeleid via de gele tunnel (R2→R3→R4). Het gaat er bij het omleiden om dat het uitvallen van de verbinding zo snel mogelijk gedetecteerd wordt. De detectie vindt plaats op de interface van R2 die verbonden is met R4. Bij de configuratie van deze interface wordt aangegeven dat gebruik gemaakt moet worden van de Link Protection tunnel als de verbinding naar R4 uitvalt. Voor de

rode Node Protection tunnel geldt een soortgelijk verhaal. Als node R2 uitvalt, wordt de tunnel omgeleid via de rode tunnel (R1→R3→R4). De detectie van het uitvallen van R2 vindt plaats op de interface van R1 die verbonden is met R2. Bij de configuratie van deze interface wordt aangegeven dat gebruik gemaakt moet worden van de rode Node Protection tunnel indien R2 uitvalt. Verschil tussen de situatie met of zonder MPLS Traffic Engineering Fast Reroute is 5 à 10 seconden data uitval zonder Fast Reroute tegenover 50 ms met Fast Reroute. Nog belangrijker is mogelijk dat een telefoongesprek zonder Fast Reroute daadwerkelijk uitvalt en met Fast Reroute (bijna) onmerkbaar is. Met Fast Reroute kan dus beter aan de SLA's voldaan worden.

In dit voorbeeld is de normale tunnel (blauw) heel kort, waardoor de Node Protection tunnel op dezelfde router (R1) begint als de normale tunnel. Dat hoeft normaal niet zo te zijn. Als de route van de normale tunnel over tien routers loopt, zeg R1 t/m R10 loopt, kan elk van deze routers (R1 en R10 uitgezonderd) beschermd worden door een Node Protection tunnel. De Node Protection tunnel kan dan bijvoorbeeld op R7 beginnen en op R9 eindigen. Het gaat er om dat één van de nodes in de tunnelroute beschermd wordt door een omleiding. In principe kan elke router in het netwerk beschermd worden, zolang er maar een omleiding beschikbaar is. In de praktijk kiest de netwerkbeheerder er meestal voor om de belangrijkste routers en verbindingen in het netwerk te beschermen.

Naast Link - en Node Protection is ook Path Protection mogelijk. Daarbij wordt naast de normale tunnel ook een backup tunnel opgezet. De backup tunnel loopt ook tussen het begin- en eindpunt van de normale tunnel, maar gebruikt een andere route. Het is daarbij verstandig als de backup route zo min mogelijk gebruikmaakt van routers en verbindingen die al door de normale tunnel worden gebruikt. Dit voorkomt dat de backup tunnel ook niet bruikbaar is als de normale tunnel uitvalt.

7. Effectiviteitcriteria voor het benutten van een (MPLS) netwerk

Doel van dit hoofdstuk is het vastleggen van de criteria die bepalen hoe effectief de benutting van een netwerk is. De hoofdvraag van dit onderzoek richt zich op het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering door de inzet van MPLS Traffic Engineering technieken. Om uiteindelijk te bepalen of een netwerk effectiever benut wordt, dient eerst vastgelegd te worden welke aspecten bepalen hoe effectief een netwerk benut wordt.

Met het benutten van een netwerk wordt het gebruikmaken van de beschikbare resources (verbindingen en routers) bedoeld. Effectief betekent doeltreffend. Iets effectief benutten zou dus omschreven kunnen worden als iets gebruiken zoals het bedoeld is. Een netwerk wordt normaal gesproken aangelegd met als doel het transporteren van data. De eigenaar van een netwerk (bv. een ISP) heeft als achterliggend doel om geld te verdienen aan het transporteren van data. De gebruiker betaalt de ISP om data te transporteren, bijvoorbeeld tussen kantoor A en B van de gebruiker. Data moet dus niet zomaar getransporteerd worden over het netwerk, maar gericht van A naar B. Zoals ieder commercieel bedrijf wil een ISP zoveel mogelijk verdienen met zo weinig mogelijk middelen. Wanneer een netwerk eenmaal is aangelegd, is het doel van een ISP dus om zoveel mogelijk data van gebruikers zo snel als mogelijk gericht over het netwerk transporteren. In de ideale situatie (vanuit de ISP gezien) wordt de capaciteit van alle verbindingen gedurende 100% van de tijd voor 100% gebruikt, waarbij al het dataverkeer altijd via de snelste route van begin- naar eindpunt getransporteerd wordt. In die situatie wordt het netwerk het meest effectief benut.

Criteria ideale situatie

Uit de beschrijving van de ideale situatie kunnen de volgende effectiviteitcriteria afgeleid worden:

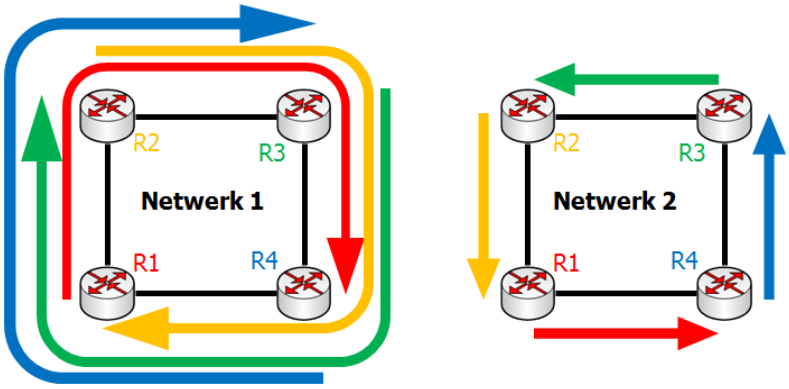
1. capaciteitsgebruik: het percentage van de beschikbare bandbreedte dat gebruikt wordt voor het transporten van data. Hoe hoger hoe beter, meest effectief is 100%;
2. het percentage van het verkeer dat de snelste route gebruikt. Hoe hoger hoe beter, meest effectief is 100%;
3. het percentage van het dataverkeer dat van het beginpunt naar het eindpunt getransporteerd wordt. Hoe hoger hoe beter, meest effectief is 100%.

ad1. Op een verbinding is altijd een bepaald percentage van de beschikbare verbinding nodig aan overhead. Onder overhead vallen headers (bv. Ethernet, MPLS en IP header) en data om de verbinding 'up' te krijgen/houden (bv. hello messages). Overhead is in de rest van dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

ad2. Het capaciteitsgebruik alleen zegt niet genoeg. Stel dat al het dataverkeer via een andere route dan de snelste wordt gestuurd. Ook dan kan het zo zijn dat het capaciteitsgebruik op alle verbindingen 100% is, terwijl het netwerk toch niet optimaal (100% effectief) benut wordt (onder figuur 9 wordt dit nader toegelicht). Normaal gesproken zal de gekozen route door een routing protocol bepaald worden (handmatige configuratie van een heel ISP netwerk is niet erg waarschijnlijk). Alle routing protocollen gebruiken een algoritme om te bepalen welke route het beste is. Wanneer het routing protocol hiervoor de snelheid van de verbinding als

enige parameter gebruikt, zal al het verkeer door het routing protocol via de snelste route gestuurd worden. OSPF en IS-IS zijn voorbeelden van zulke routing protocollen, bij IS-IS is daarvoor wel een extra commando noodzakelijk. Als (een gedeelte van) het verkeer niet de snelste route gebruikt, wordt de minder snelle route gewogen ten opzichte van de snelste route meegeteld. Stel dat 50% van het dataverkeer de snelste route neemt en 50% een route die 3 keer zo lang is. Dan wordt het totale percentage snelste route 50%*100%(=de snelste route) + 50% * 33.3% (=100%/3 als correctie voor de 3 keer zo lange route) = 66.7%.

ad3. Het is eveneens belangrijk dat het dataverkeer daadwerkelijk bij het eindpunt aankomt. Wanneer een pakketje halverwege het netwerk wordt gedropt, bijvoorbeeld door congestion op een verbinding, is het transport van het pakketje voor niets geweest. In veel gevallen wordt het pakketje nogmaals verstuurd, waarbij een gedeelte van de resources dus dubbel gebruikt worden.



Figuur 9. Netwerk 2 transporteert het verkeer veel effectiever dan netwerk 1.

Netwerk 1 en 2 beschikken over dezelfde resources (routers, verbindingen). De gekleurde pijlen geven de route aan die de pakketjes volgen van begin- naar eindpunt. R1 stuurt in beide netwerken datapakketjes naar R4 (rode lijn). In netwerk 1 is de route R1→R2→R3→R4 en in netwerk 2 R1→R4. Stel dat alle verbindingen in netwerk 1 en 2 300Mbps zijn. In netwerk 2 kan R1 dan 300Mbps naar R4 sturen. In netwerk 1 kan R1 slechts 100Mbps naar R4 sturen, omdat alle verbindingen gebruikt worden door 3 routes. Het capaciteitsgebruik is in beide gevallen 100%, maar netwerk 2 wordt veel effectiever benut.

Hoewel dit onderzoek zich richt op het effectiever benutten van een MPLS netwerk, zijn de drie genoemde effectiviteitcriteria in principe geldig voor elk type netwerk. Wanneer QoS-afspraken met klanten zijn gemaakt, komt er nog een 4^{e} criterium bij:

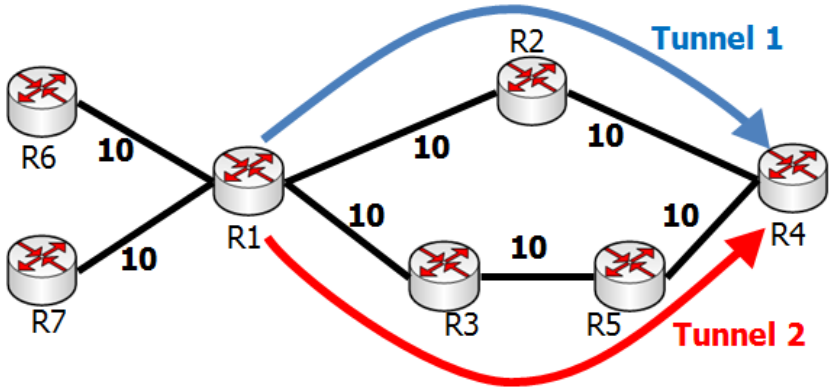
4. bij het transporteren van al het verkeer wordt rekening gehouden met bandbreedte garanties en garanties voor een lage delay.

ad4. In het algemeen worden QoS afspraken tussen de ISP en de klant in een SLA vastgelegd (zie hoofdstuk 6.2). De klant heeft er bv. baat bij dat zijn voice verkeer voorrang krijgt, anders kan de klant niet bellen via het ISP netwerk. De ISP krijgt meestal betaald voor deze extra service (delay en bandbreedte garanties). Daarmee wordt het voor de ISP ook een doel om de afgesproken garanties na te komen. Hoe beter de ISP kan voldoen aan de afgesproken

garanties, hoe effectiever het netwerk benut wordt. Omdat er in een ideaal netwerk geen congestion voorkomt, zal al het verkeer met een lage queuing delay en gegarandeerde bandbreedte worden verstuurd.

Totale effectiviteit

Uiteindelijk is het natuurlijk vooral interessant om aan de hand van de effectiviteitcriteria te bepalen wat de totale effectiviteit van de benutting van een netwerk is. Daarmee wordt het ook mogelijk om netwerken met elkaar te vergelijken. Voor het bepalen van de totale effectiviteit is het handig als de vier effectiviteitcriteria als factor geschreven worden (waarbij 100% = 1.00 en 50% = 0.50). Deze vier factoren kunnen dan vermenigvuldigd worden, het resultaat van de vermenigvuldiging is dan de totale effectiviteit. De maximale effectiviteit is uiteraard 1.00, oftewel 100%. Voordat de effectiviteitcriteria met elkaar vermenigvuldigd kunnen worden, dienen de factoren wel onafhankelijk van elkaar gemaakt te worden. Als de factoren niet onafhankelijk van elkaar zijn, wordt niet de juiste totale effectiviteit berekend. Het voorbeeld onder figuur 10 maakt duidelijk waarom de factoren nu niet onafhankelijk van elkaar zijn.



Figuur 10. Voorbeeld netwerk met Unequal cost load sharing

Alle verbindingen hebben een snelheid van 100 Mbps en een lage delay. R6 en R7 versturen beiden data met 100 Mbps versturen naar R4, bij R1 arriveert dus 200 Mbps aan dataverkeer dat naar R4 moet. De QoS afspraken in dit voorbeeld zijn dat het verkeer afgeleverd wordt (dus bandbreedte garantie) en dat delay gevoelig verkeer met een lage delay wordt verstuurd.

In de situatie zonder MPLS Traffic Engineering stuurt R1 alle data echter naar de route met de laagste cost, dus 100% neemt de snelste route. R1 stuurt dus 200 Mbps naar een verbinding met een snelheid van slechts 100 Mbps. Hierdoor zal 100 Mbps verloren gaan, of op z'n minst opnieuw verstuurd moeten worden. In totaal is er 200 Mbps aan capaciteit tussen R1 en R4 (verdeeld over twee routes). De verbindingen van R1→R3→R5→R4 worden echter niet gebruikt. Er wordt dus slechts 100 Mbps van de 200 Mbps gebruikt, wat overeenkomt met 50%. Slechts 100 Mbps van de 200Mbps wordt van begin naar eind getransporteerd (50%). Omdat 50% van de verstuurde data niet wordt afgeleverd, voldoet maar 50% van de data aan de gestelde QoS eisen.

Omschrijven naar een factor en vermenigvuldigen levert een totale effectiviteit op van 1.00 * 0.50 * 0.50 * 0.50 = 0.125 (ofwel 12.5%). De totale effectiviteit valt zo laag uit omdat de

factoren nog afhankelijk van elkaar zijn. Slechts 50% van de data voldoet aan de gestelde criteria **omdat** slechts 50% van de beschikbare capaciteit wordt gebruikt. Als wel 100% van de beschikbare capaciteit werd gebruikt, zou in dit geval ook 100% van het verkeer aan de QoS-eisen voldoen. Deze afhankelijkheid kan eruit gehaald worden door het QoS-criterium te herdefiniëren als: het percentage (geschreven als factor) **van het getransporteerde verkeer** dat aan de QoS-afspraken (garanties voor bandbreedte en lage delay) voldoet.

Het criterium van het transporteren van begin naar eindpunt bevat ook dezelfde afhankelijkheid. Als wel 100% van de beschikbare capaciteit werd gebruikt, zou in dit geval ook 100% van het verkeer van het begin naar het eindpunt zijn getransporteerd. Deze afhankelijkheid kan er uit gehaald worden door dit criterium in het capaciteitscriterium op te nemen. Het nieuwe criterium voor het capaciteitsgebruik wordt dan: het percentage van de beschikbare bandbreedte dat gebruikt wordt voor het transporten van data **van begin naar eindpunt**. Het oorspronkelijke criterium voor het transporteren van het begin naar het eindpunt vervalt daarmee.

De onafhankelijke criteria op een rij:

1. capaciteitsgebruik: het percentage (als factor) van de beschikbare bandbreedte dat gebruikt wordt voor het transporten van data van begin naar eindpunt.
2. snelste route: het percentage (als factor) van het verkeer dat de snelste route gebruikt. (de snelste route is daarbij gedefinieerd als die route die door het routing protocol op basis van het Shortest Path First algoritme als snelste/beste route wordt berekend).
3. QoS-afspraken: het percentage (als factor) van het getransporteerde verkeer dat aan de QoS-afspraken (garanties voor bandbreedte en lage delay) voldoet.

Deze onafhankelijke criteria zullen tijdens de rest van het onderzoek worden gebruikt. De totale effectieve benutting is de factor die overblijft na vermenigvuldiging van de factoren van de drie criteria.

8. Bijdrage MPLS Traffic Engineering aan effectievere benutting

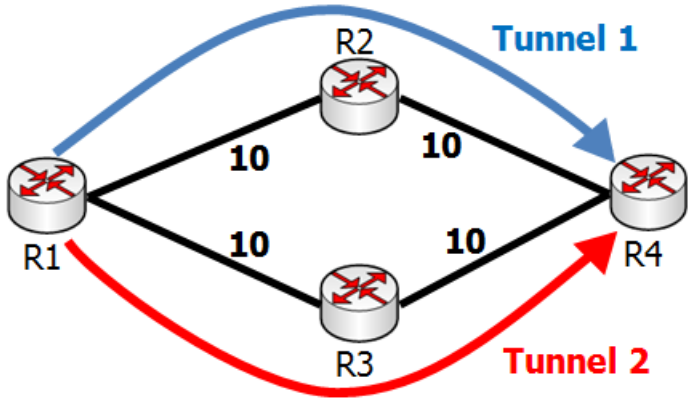
In hoofdstuk 7 zijn de criteria vastgelegd die de effectiviteit van de benutting van een MPLS netwerk bepalen. Aan de hand van deze criteria wordt een MPLS netwerk met standaard routering vergeleken met een MPLS netwerk met Traffic Engineering technieken. Deze vergelijking heeft als doel antwoord te geven op deelvraag 6 en 7:

- Hoe effectief wordt een MPLS netwerk zonder Traffic Engineering technieken benut?
- Hoe zouden de gevonden Traffic Engineering technieken bij kunnen dragen aan het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?

Teneinde de effectiviteitcriteria te bepalen werd in hoofdstuk 7 de werking van een ideaal netwerk vanuit het oogpunt van de ISP beschreven. Dit ideale netwerk is puur theoretisch. Zo'n ideaal benut netwerk vereist perfect voorspelbare gebruikers en 100% betrouwbare apparatuur. Als elke gebruiker het netwerk elke dag precies hetzelfde gebruikt, zou het mogelijk zijn om een netwerk te ontwerpen dat hier perfect bij aansluit. In hoofdstuk 3 is echter al aangegeven dat er altijd momenten zullen voorkomen waarop het netwerkontwerp niet precies aansluit bij het dataverkeer. Bij uitleg van de begrippen network engineering en traffic engineering (eveneens hoofdstuk 3) werd een analogie met het wegverkeer gemaakt. Voor het gebruik van een netwerk is die analogie ook goed bruikbaar. Een goed ontworpen snelweg is gemiddeld genomen redelijk goed in staat om al het verkeer te verwerken. Toch ontstaat er soms file omdat te veel mensen tegelijk over de snelweg willen of omdat er een ongeluk is gebeurt. In die gevallen kan het lonend zijn om voor een provinciale weg te kiezen of een eindje om te rijden via een andere snelweg. In het geval van netwerkverkeer is het niet anders. Het is te duur om een netwerk aan te leggen dat alle gebruikspieken aankan en er valt wel eens een verbinding of router uit. Hierdoor ontstaat er op sommige verbindingen congestion terwijl andere gedeeltelijk onbenut blijven.

Nu duidelijk is dat het ideale ISP netwerk niet bestaat, worden de voorbeelden uit hoofdstuk 6 nogmaals bekeken. Als het ideale netwerk wel bestond waren deze voorbeelden nutteloos. De voorbeelden gaan namelijk allemaal uit van congestion en in een ideaal netwerk is dat er niet. De voorbeelden worden beoordeeld op de vier effectiviteitcriteria.

Equal cost load sharing



Figuur 11. Voorbeeld equal cost load sharing tussen tunnel 1 (blauw) en tunnel 2 (rood).

Nogmaals het voorbeeld netwerk zoals in hoofdstuk 6.1 besproken. Alle verbindingen hebben een snelheid van 100 Mbps en een lage delay. Bij R1 arriveert 200 Mbps aan dataverkeer dat naar R4 moet. De percentages van de criteria worden gegeven in tabel 1.

Tabel 1. Eerste voorbeeld equal cost load balancing

	Capaciteitsgebruik	Snelste route	Voldaan aan QoS	Totale effectiviteit
Zonder MPLS TE	100%	100%	100%	100%
Met MPLS TE	100%	100%	100%	100%

In deze situatie is er geen verschil tussen een MPLS netwerk met- of zonder Traffic Engineering. In beide gevallen komt er precies zoveel verkeer aan, als het netwerk kan verwerken. Daardoor wordt alle beschikbare capaciteit voor 100% benut om data van het begin naar het eind te transporteren. Al het verkeer neemt de kortste route, beide routes zijn immers gelijk. Er is geen congestion, er worden dus ook geen pakketjes gedropt. Omdat er geen congestion is en de verbindingen een lage delay hebben, voldoen alle pakketjes aan de QoS eisen.

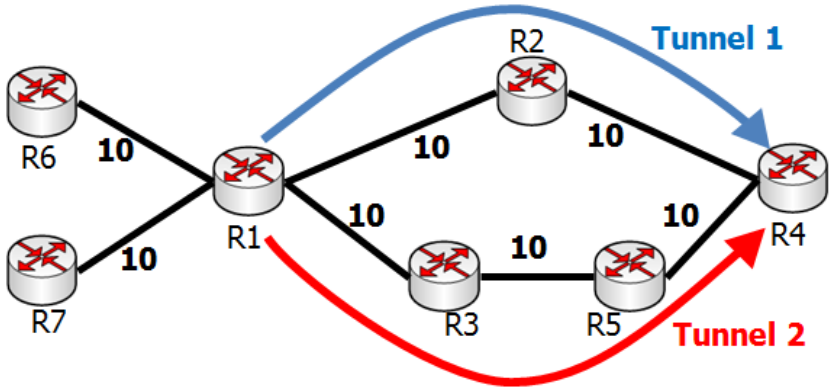
Tweede voorbeeld equal cost load sharing voorbeeld gaat uit van hetzelfde netwerk (figuur 11). Alle verbindingen hebben weer een snelheid van 100 Mbps en lage delay, behalve de verbinding tussen R1 en R4, deze heeft een hoge propagation delay. Dat is de delay nodig om een pakketje van het begin van de verbinding naar het eind van de verbinding te krijgen. Voor koper of glas is deze delay laag, maar bij een satellietverbinding is de propagation delay hoog. Bij R1 arriveert 200 Kbps aan dataverkeer dat naar R4 moet, 20% van het verkeer is delay-gevoelig voice verkeer. Op alle verbindingen is LLQ ingesteld om het delay gevoelige verkeer snel te versturen.

Tabel 2. Tweede voorbeeld equal cost load balancing

	Capaciteitsgebruik	Snelste route	Voldaan aan QoS	Totale effectiviteit
Zonder MPLS TE	100%	100%	90%	90%
Met MPLS TE	100%	100%	100%	100%

Enig verschil met het eerste voorbeeld zit in het percentage verkeer dat voldoet aan de QoS afspraken. Uitgaande van een gelijke verdeling wordt 10% van het delay-gevoelig verkeer via R2 verstuurd en eveneens 10% via R3. Het voice verkeer dat via R2 gaat, loopt een te hoge totale delay op. Daardoor voldoet deze 10% niet aan de QoS afspraken. Met MPLS Traffic Engineering is het mogelijk om voor het voice verkeer een tunnelroute te bepalen met en lage delay. Al het voice verkeer wordt dan via tunnel 2 gestuurd. Hierdoor loopt het geen hoge delay op en voldoet al het verkeer aan de QoS afspraken.

Unequal cost load sharing



Figuur 12. Voorbeeld unequal cost load sharing tussen tunnel 1 (blauw) en tunnel 2 (rood).

Nogmaals het voorbeeld netwerk zoals in hoofdstuk 6.1 besproken. Alle verbindingen hebben een snelheid van 100 Mbps en lage delay. R6 en R7 versturen beiden data met 100 Mbps versturen naar R4, bij R1 arriveert dus 200 Mbps aan dataverkeer dat naar R4 moet. De enige QoS afspraak in dit voorbeeld is dat het verkeer afgeleverd wordt, er zijn dus geen afspraken over delay-gevoelig verkeer.

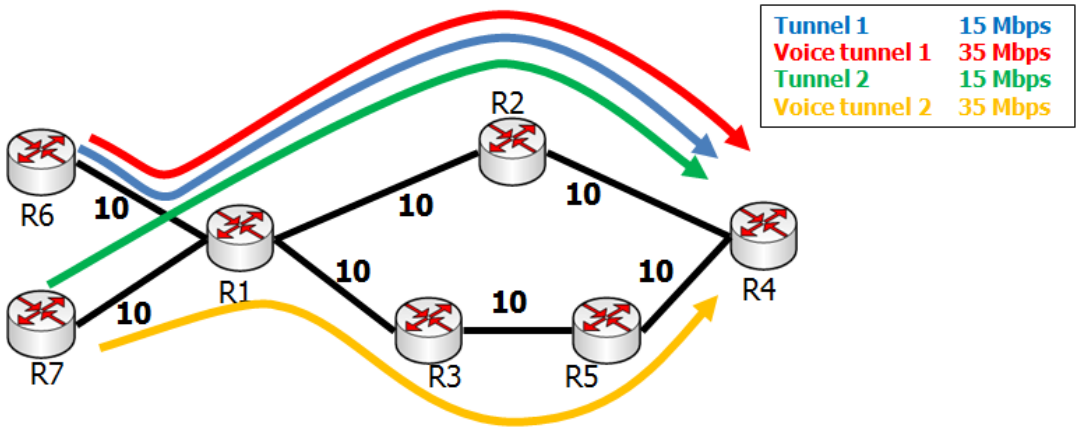
Tabel 3. Voorbeeld unequal cost load balancing

	Capaciteitsgebruik	Snelste route	Voldaan aan QoS	Totale effectiviteit
Zonder MPLS TE	50%	100%	100%	50%
Met MPLS TE	100%	87.5%	100%	87.5%

In de situatie zonder MPLS Traffic Engineering stuurt R1 alle data echter naar de route met de laagste cost. R1 stuurt dus 200 Mbps naar een verbinding met een snelheid van slechts 100 Mbps. Hierdoor zal 100 Mbps verloren gaan, of op z'n minst opnieuw verstuurd moeten worden. In totaal is er tussen R1 en R4 200 Mbps aan capaciteit beschikbaar, 100 Mbps van R1→R2→R4 en 100 Mbps van R1→R3→R5→R4. De verbindingen van R1→R3→R5→R4 worden echter niet gebruikt, waardoor er worden dus slechts 100 van de 200 Mbps (50%) wordt gebruikt om data van het begin naar het eindpunt te transporteren. Het getransporteerde dataverkeer voldoet wel aan de gestelde QoS eisen (100%), dit wordt allemaal afgeleverd.

Met MPLS Traffic Engineering wordt 200 Mbps van de beschikbare 200 Mbps gebruikt om data van begin naar eind te transporteren (100%). Al het getransporteerde verkeer wordt afgeleverd, waardoor ook 100% aan de QoS eisen voldoet. 50% van het verkeer gaat door Tunnel 1 en gebruikt de snelste route, het andere verkeer gebruikt een route met een 1.33 keer zo hoge cost (40/30 = 1.33, 40 is de cost van route R7→R1→R3→R5→R4 en 30 is de cost van route R6→R1→R2→R4). De effectiviteit van de route door Tunnel 2 is dus 1/1.33 = 75%. Het totaal percentage voor het gebruik van de snelste route is dan: 50%*100% + 50%* 75% = 87.5%.

DiffServ Traffic Engineering



Figuur 13. Voorbeeld netwerk met DS-TE tunnels

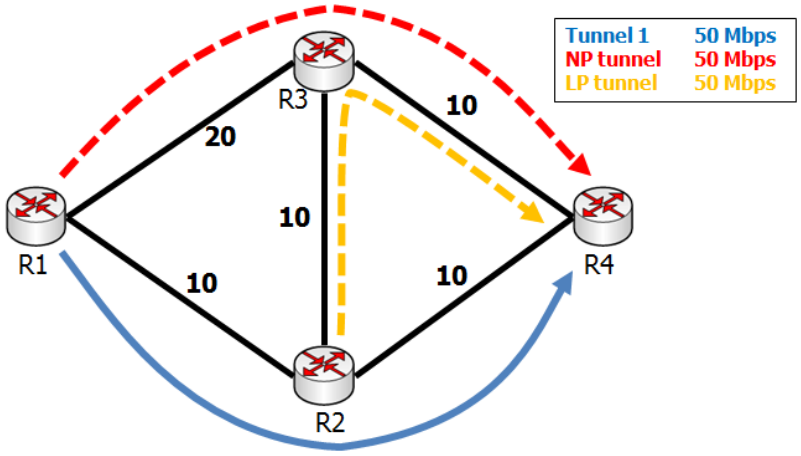
Het voorbeeld uit hoofdstuk 6.2 wordt nogmaals besproken. Alle verbindingen hebben een snelheid van 100 Mbps en lage delay. R6 en R7 versturen beiden data met 50 Mbps versturen naar R4. Beide datastromen van 50 Mbps bestaan uit 35 Mbps voice verkeer en 15 Mbps mailverkeer. Uitgangspunt is dat alle verbindingen maximaal 50% voice verkeer aankunnen. De QoS afspraken zijn dat het verkeer afgeleverd wordt en dat het voice verkeer met een lage delay verstuurd wordt.

Tabel 4. Voorbeeld DiffServ Traffic Engineering

	Capaciteitsgebruik	Snelste route	Voldaan aan QoS	Totale effectiviteit
Zonder MPLS TE	100%	100%	80%	80%
Zonder DS-TE	100%	100%	80%	80%
Met DS TE	100%	91.25%	100%	91.25%

Er zijn in dit voorbeeld eigenlijk drie situaties. De situatie zonder MPLS Traffic Engineering, de situatie met MPLS Traffic Engineering tunnels maar zonder DS-TE tunnels (in de tabel aangeduid als 'Zonder DS-TE') en de situatie met DS-TE tunnels. De situatie zonder MPLS Traffic Engineering is echter gelijk aan de situatie zonder DS-TE. Zowel in de situatie zonder MPLS TE als in de situatie zonder DS-TE gaat alle data via de kortste route R1→R2→R4 (100%). Alle benodigde capaciteit wordt gebruikt (100%). Op de verbindingen tussen R1→R2 en R2→R4 komt echter wel 20 Mbps te veel aan voice verkeer. De verbinding is slechts in staat om 50 Mbps voice verkeer met een lage delay door te sturen en er moet 70 Mbps aan voice verkeer worden verwerkt. Hierdoor loopt 20 Mbps van de 100 Mbps te veel vertraging op (20%), waardoor slechts 80% aan de QoS eisen voldoet. De totale effectieve benutting komt daarmee voor beide situaties op 80%. Met DS-TE wordt alle benodigde capaciteit gebruikt (100%). 65% van het verkeer gaat via R1→R2→R4 en gebruikt de snelste route, het andere verkeer gebruikt een route met een 1.33 keer zo hoge cost. De effectiviteit van de andere route (R1→R3→R5→R4) is dus 1/1.33 = 75%. Het totaal percentage voor het gebruik van de snelste route is dan: 65%*100% + 35%* 75% = 91.25%. Op geen van de verbindingen wordt het maximale percentage voice verkeer overschreden, waardoor al het voice verkeer met een lage delay wordt afgeleverd. Al het verkeer voldoet dus aan de QoS eisen (100%). De totale effectieve benutting is 91.25%.

Recovery en Protection



Figuur 14. Voorbeeld netwerk met Link Protection en Node Protection

Het is lastig om het gegeven voorbeeld uit hoofdstuk 6.3 te vertalen naar een realistisch voorbeeld ten aanzien van de totale effectiviteit. Het gaat bij de Link- en Node Protection vooral om het snel oplossen van incidentele situaties. Alle andere voorbeelden waren prima te vertalen naar een soort oneindige lang durende situatie met een constante datastroom. De incidenten (uitvallen verbinding of router) worden zonder Fast Reroute (FRR) afhankelijk van de netwerkgrootte in ca. 1 tot 10 seconden opgelost. Met FRR wordt het incident binnen 50 ms opgelost. Het voorbeeld in tabel 5 gaat uit van één incident gedurende één minuut. Uitgangspunt is dat het oplossen van het incident zonder FRR 2 seconden kost. De QoS afspraken zijn dat het verkeer afgeleverd wordt en dat delay-gevoelig verkeer met een lage delay verstuurd wordt.

Tabel 5. Voorbeeld Recovery en Protection

	Capaciteitsgebruik	Snelste route	Voldaan aan QoS	Totale effectiviteit
Zonder FRR	96.67%	100%	100%	96.67%
Met FRR	99.92%	100%	100%	99.92%

Al het verkeer, zowel met als zonder FRR neemt de snelste route. Als er een router of verbinding uitvalt, is dat misschien wel een iets langere route, maar op dat moment is het de snelst mogelijke route in het netwerk. Daarom is de snelste route voor beide situaties 100%. Al het **getransporteerde** verkeer voldoet aan de QoS eisen. Het verschil zit in het capaciteitsgebruik en dan met name in de tijd dat de beschikbare capaciteit wordt gebruikt. Het netwerk zonder FRR gebruikt de beschikbare capaciteit gedurende 58 van de 60 seconden (96.67%). Tijdens het 2 seconden durende incident wordt de capaciteit immers niet gebruikt, terwijl de capaciteit feitelijk wel aanwezig is. Het netwerk met FRR gebruikt de beschikbare capaciteit gedurende 59.95 van de 60 seconden (99.92%). In dit geval duurt het incident slechts 50 ms (0.05 s) omdat de FRR technieken voor een zeer snelle alternatieve route zorgen.

Bijdrage MPLS Traffic Engineering technieken aan effectievere benutting

Uit de voorbeelden in dit hoofdstuk wordt duidelijk hoe effectief netwerken zonder MPLS Traffic Engineering worden benut. Deze voorbeeld situaties kunnen ook vertaald worden naar vergelijkbare situaties. Daarmee is deelvraag 6 beantwoord. Voor deze voorbeeld netwerken is de effectieve benutting met MPLS Traffic Engineering eveneens gegeven. Daarmee is aangetoond dat de inzet van MPLS Traffic Engineering technieken in veel situaties inderdaad voor een effectievere benutting zorgt. Uit deze voorbeelden kan het antwoord op deelvraag 7 worden afgeleid. Hierna wordt toegelicht op welke wijze de verschillende technieken bij kunnen dragen aan het effectiever benutten van een MPLS netwerken zonder Traffic Engineering.

In situaties met meerdere gelijke (equal cost) routes door het netwerk kunnen MPLS Traffic Engineering tunnels worden ingezet om delay gevoelig verkeer de juiste route te laten nemen. Dit verkeer kan over een route met verbindingen met een lage delay worden gestuurd.

In situaties met meerdere ongelijke routes (unequal cost) routes door het netwerk kunnen MPLS Traffic Engineering tunnels worden ingezet om de beschikbare capaciteit beter te benutten. Alle beschikbare capaciteit kan hierdoor worden benut.

In situaties waarbij het maximale percentage delay gevoelig verkeer op een verbinding beperkt dient te worden, kunnen DS-TE tunnels worden ingezet voor een effectievere benutting. Hierdoor kan al het verkeer aan de QoS eisen voldoen.

In situaties waarbij een router of verbinding uitvalt kan de inzet van MPLS Traffic Engineering Fast Reroute tunnels ervoor zorgen dat de capaciteit veel effectiever wordt benut. Hiermee wordt de hoeveelheid data die verloren gaat na het uitvallen van een verbinding of router tot een minimum beperkt.

9. Proof of Concept

In hoofdstuk 7 zijn de criteria vastgelegd die de effectiviteit van de benutting van een MPLS netwerk bepalen. In hoofdstuk 8 is een aantal voorbeeld netwerken getoetst aan deze criteria. Uit deze toetsing is afgeleid dat de MPLS Traffic Engineering technieken in een aantal situaties voor een effectievere benutting van een MPLS netwerk met standaard routering zouden moeten kunnen zorgen. Dit hoofdstuk richt zich op het aantonen van de werking van de MPLS Traffic Engineering technieken in de praktijk. Daartoe zal een aantal stappen doorlopen worden.

Eerst zullen de eisen aan de testnetwerken worden vastgesteld. Deze eisen worden vervolgens vertaald naar een aantal netwerkontwerpen. De ontworpen netwerken worden daarna gebouwd. De gebouwde netwerken worden onderworpen aan één of meerdere testen. Gekeken zal worden of de uitkomsten van de testen voldoen aan de verwachting. Indien dat zo is worden de resultaten gerapporteerd. Indien de testen niet voldoen aan de verwachting, wordt beschouwd of de testen dan wel de verwachting aangepast dient te worden.

Aan het eind van dit hoofdstuk zullen de deelvragen 8, 9 en 10 beantwoord zijn. Deelvraag 8, 9 en 10 zijn:

- Hoe zou het effectiever benutten van het netwerk door toepassing van deze technieken in de praktijk getest kunnen worden?
- Welk netwerk is nodig voor zo'n praktijktest?
- Zorgen deze technieken in de praktijk inderdaad voor een effectievere benutting van het netwerk?

De genoemde stappen worden in de rest van dit hoofdstuk beschreven, maar eerst worden enkele keuzes toegelicht, die voorafgaand aan het Proof of Concept gedeelte van dit onderzoek gemaakt zijn.

9.1 Keuzes gemaakt voorafgaand aan Proof of Concept

Voor aanvang van dit onderzoek waren er veel onduidelijkheden omtrent het Proof of Concept gedeelte van dit onderzoek. Zo was bijvoorbeeld het aantal (toepassingsdoeleinden van) MPLS Traffic Engineering technieken onbekend. Ook was niet bekend welke factoren de effectieve benutting van een MPLS netwerk beïnvloeden en of de effectieve benutting met de beschikbare apparatuur gemeten kon worden. Inmiddels zijn de toepassingsdoeleinden van de MPLS Traffic Engineering technieken bekend, net als de factoren die de effectieve benutting beïnvloeden. Tevens is bekend wat er gemeten moet worden teneinde de effectieve benutting te bepalen. Op basis van deze kennis is een aantal keuzes gemaakt, deze worden hierna toegelicht.

Eén testnetwerk per toepassingsdoeleinde

Eerste keuze is om per toepassingsdoeleinde van MPLS Traffic Engineering één testnetwerk te bouwen. Er wordt dus één testnetwerk gebouwd voor 'Load sharing', één voor 'DiffServ (Quality of Service)' en één voor 'Protection en Recovery'. Reden voor deze keuze is dat het omwille van de totale tijd van 17 weken voor dit onderzoek niet mogelijk is om meerdere testnetwerken te

bouwen per toepassingsdoeleinde. Op basis van de voorbeeld netwerken uit hoofdstuk 8 is binnen 'Load sharing' gekozen voor een netwerk met 'Unequal cost load sharing'. In hoofdstuk 6.1 werd al geconstateerd dat de ware kracht van MPLS Traffic Engineering blijkt uit de mogelijkheid om load balancing toe te kunnen passen bij routes met een ongelijke cost. Dit werd onderschreven door de theoretische totale effectieve benutting van het voorbeeld netwerk met 'Unequal cost load sharing' (tabel 3) in hoofdstuk 8. Er is dus geen netwerk met 'Equal cost load sharing' getest. Uit hoofdstuk 8 is gebleken dat 'Equal cost load sharing' kan worden ingezet om delay gevoelig verkeer de juiste route te laten nemen. Uit hoofdstuk 8 blijkt echter ook dat middels DiffServ Traffic Engineering hetzelfde bereikt kan worden met een techniek die in feite nog geavanceerder is. DS-TE kiest zoals bleek niet alleen de juiste route, maar controleert ook nog of er op die route voldoende bandbreedte beschikbaar is voor het delay gevoelig verkeer. Op basis van deze gronden is besloten om wel een testnetwerk met 'Unequal cost load balancing' te bouwen, maar geen netwerk met 'Equal cost load balancing'.

Ontwerpen testnetwerken worden gebaseerd op voorbeeld netwerken

Tweede keuze is om de ontwerpen van de testnetwerken te baseren op de voorbeeld netwerken die in hoofdstuk 8 behandeld zijn. Hiervoor is een aantal redenen. Door deze keuze wordt het mogelijk om de theorie met de praktijk rechtstreeks te vergelijken. Als één van de voorbeeld netwerk in theorie bijvoorbeeld 20% effectiever benut wordt, zou dat in de praktijk ook zo moeten zijn. Als dat niet zo blijkt te zijn, is of de theorie, of de praktijktest onjuist. Deze vergelijking is dus tevens een controle op de juistheid van beiden. Wanneer een compleet ander netwerk wordt ontworpen, kan deze controle niet (eenvoudig) uitgevoerd worden. Een andere reden is dat er veel tijd is besteed aan de uitleg bij de voorbeeld netwerken. Het bleek vrij lastig om de totale effectieve benutting van een netwerk te bepalen en te omschrijven. Wanneer een ander netwerk ontworpen wordt, kost dit opnieuw veel tijd. Gezien de beperkte tijd lijkt het niet zinnig om een gedeelte van de resterende tijd hieraan te besteden, terwijl er al goed uitgewerkte voorbeelden beschikbaar zijn.

Gebruik Cisco laboratorium

In het onderzoeksplan was aangegeven dat de testnetwerken ofwel met behulp van GNS3 of Dynamips geëmuleerd zouden worden ofwel in het Cisco laboratorium van de Haagse Hogeschool gebouwd zouden worden. Het Cisco laboratorium van de Haagse Hogeschool is het lokaal met Cisco apparatuur ten behoeve van practica. In beide gevallen wordt gebruik gemaakt van Cisco apparatuur. GNS3 en Dynamips zijn softwarepakketten waarmee alleen Cisco routers geëmuleerd kunnen worden. Het Cisco laboratorium bevat zoals de naam al aangeeft eveneens alleen Cisco routers.

Zoals in het onderzoeksplan al werd aangegeven, zitten de grootste risico's voor dit onderzoek in de praktijktesten. Met de emulatiesoftware is er een kleine kans dat emulatie van netwerken met meer dan zes routers niet mogelijk is. Op één PC kunnen maximaal ongeveer zes routers geëmuleerd worden, het precieze aantal is afhankelijk van het geheugen van de PC en het type router dat geëmuleerd wordt. Bij meer dan zes routers zullen meerdere PC's gekoppeld moeten worden voor het uitvoeren van de emulatie. Voor de voorbeeld netwerken uit hoofdstuk 8 zijn

meer dan zes routers nodig. Daarmee wordt het emuleren in ieder geval complexer, omdat ervaring met het gebruik van meerdere PC's voor het emuleren van één netwerk ontbreekt. Naast dit risico was er vooraf onduidelijkheid over de manier waarop de effectieve benutting gemeten kon worden. Met het bepalen van de criteria voor de effectieve benutting is daar inmiddels meer duidelijkheid over. Uit het voorbeeld netwerk van DiffServ Traffic Engineering (figuur 13) blijkt bijvoorbeeld dat de delay van datapakketjes gemeten moet worden om de QoS eisen te toetsen. Het is de vraag of met de emulatiesoftware ook realistische delay metingen uitgevoerd kunnen worden. De processor van de PC waarop het netwerk geëmuleerd wordt, wordt behoorlijk belast. De invloed van de processorbelasting op de emulatie en de delay van pakketjes is onduidelijk.

Er kleven dus nogal wat risico's aan de emulatiesoftware. Daarom is een inventarisatie van de apparatuur in het Cisco laboratorium gemaakt. Doel van de inventarisatie is om te bepalen in hoeverre de apparatuur in het Cisco laboratorium geschikt is om testnetwerken mee te bouwen. In Osborne & Simha (2002, p.82) wordt aangegeven dat de MPLS Traffic Engineering technieken niet in alle Cisco IOS Software opgenomen zijn. De IOS (Internetwork Operating System) is het besturingsysteem van de router. De mogelijkheden van de IOS worden bepaald door het type en de versie. Voor de testnetwerken is belangrijk dat alle MPLS Traffic Engineering technieken die getest moeten worden, ook ondersteund worden door de IOS. Als dat niet het geval is, kunnen de testen niet worden uitgevoerd.

Uit de inventarisatie is gebleken dat er 16 routers zijn die de MPLS Traffic Engineering technieken voor 'Load sharing' en 'DS-TE' ondersteunen. Vier van deze routers ondersteunen ook de MPLS Traffic Engineering technieken voor 'Recovery en Protection'. De 16 routers hebben allemaal twee FastEthernet interfaces. Van de 16 routers hebben 12 routers twee seriële interfaces en vier routers hebben vier seriële interfaces. Het aantal interfaces bepaalt met hoeveel andere routers de router verbonden kan worden. Het type interface bepaalt met welke snelheid de routers onderling verbonden kunnen worden. FastEthernet interfaces zijn 100 Mbps, seriële interfaces zijn instelbaar tot maximaal 8 Mbps. Uit de inventarisatie bleek dat er ook nog vier 'Pagent' routers in het laboratorium zijn. Dat zijn routers waarmee dataverkeer gegenereerd kan worden en waarmee de delay van dat dataverkeer gemeten kan worden. Zoals gezegd is het meten van de delay nodig om de QoS eisen te toetsen bij DiffServ Traffic Engineering.

Enige beperking die uit de inventarisatie blijkt, is dus het aantal routers dat de MPLS Traffic Engineering technieken voor Recovery en Protection ondersteunt. Het voorbeeld netwerk in hoofdstuk 8 (figuur 14) bestaat echter ook slechts uit vier routers. Het zou dus in ieder geval mogelijk moeten zijn om met vier routers een testnetwerk voor 'Recovery en Protection' te maken.

9.2 Eisen aan testnetwerken

Eerst worden de algemene eisen behandeld, dit zijn eisen die voor alle testnetwerken gelden. Daarna worden achtereenvolgens de eisen voor het netwerk met 'Unequal cost load sharing', 'DiffServ Traffic Engineer' en 'Recovery en Protection' behandeld.

Algemene eisen

Hierna volgt de lijst met algemene eisen aan de testnetwerken. Onder deze lijst staat een toelichting op de eisen.

Algemene eisen aan de testnetwerken:

1. De testnetwerken moeten gebouwd kunnen worden met de aanwezige routers in het Cisco laboratorium van de HHS.
2. De testnetwerken dienen gebruik te maken van OSPF of IS-IS.
3. Alle routers dienen hun netwerkinformatie te delen.
4. Op alle MPLS Traffic Engineering routers dient een loopback interface met ip adres te worden aangemaakt.
5. Op alle routers dient Cisco Express Forwarding (CEF) en MPLS geactiveerd te worden.
6. Op alle routers in de situatie met MPLS Traffic Engineering dient MPLS Traffic Engineering geactiveerd te worden.

ad1. Zoals in hoofdstuk 9.1 reeds toegelicht worden de testnetwerken gebouwd met de routers in het Cisco laboratorium van de HHS. Daar is ook reeds toegelicht dat het aantal routers, het IOS (het besturingssysteem) van de routers en het type en het aantal interfaces op de routers invloed heeft op de te bouwen testnetwerken. Op basis van een inventarisatie van de routers is bepaald dat deze invloed beperkt is en lijkt er voldoende geschikte apparatuur om de testnetwerken te kunnen bouwen.

ad2. In hoofdstuk 5 (onder het kopje 'De route van de tunnel') is reeds uitgelegd dat de route van de tunnel met behulp van CSPF (Constrained Shortest Path First) wordt bepaald. Ook is uitgelegd dat CSPF daarbij gebruik maakt van gegevens die CSPF van OSPF of IS-IS krijgt. Netwerken waarin gebruik gemaakt wordt van MPLS Traffic Engineering tunnels kunnen hierdoor alleen in combinatie met het routing protocol OSPF of IS-IS worden toegepast.

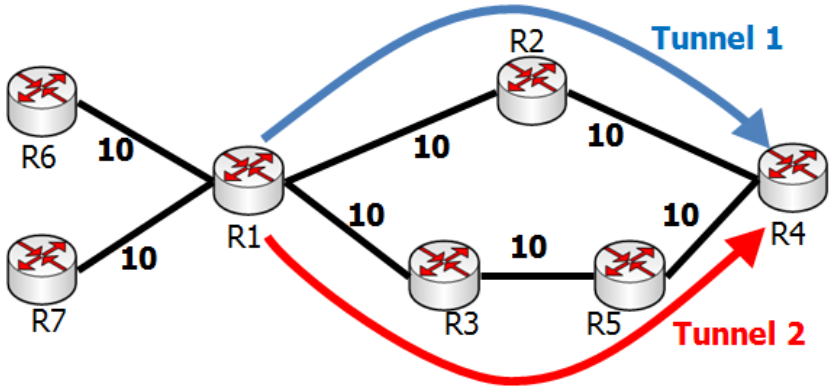
ad3. Met het delen van netwerkinformatie wordt bedoeld dat de routers in het netwerk elkaar informeren over alle netwerken die zij kunnen bereiken. Het routing protocol zorgt hiervoor, maar dit gaat niet vanzelf. Bij gebruik van OSPF dient bijvoorbeeld het commando 'network 10.0.0.0 0.0.0.3 area 0' ingevoerd te worden. Wanneer dit commando ingevoerd wordt op router R1, geeft R1 aan de andere routers in area 0 door dat netwerk 10.0.0.0 via R1 bereikt kan worden.

ad4. In Osborne & Simha (2002, p.82) wordt aangegeven dat een loopback interface met ip adres noodzakelijk is voor het gebruik van MPLS Traffic Engineering. Het loopback ip adres wordt gebruikt als router id binnen het netwerk.

ad5. In Osborne & Simha (2002, p.82) wordt aangegeven dat CEF noodzakelijk is voor het gebruik van MPLS (Traffic Engineering). Op alle routers dient MPLS geconfigureerd te worden. In de voorbeeld netwerken wordt een vergelijking gemaakt tussen een MPLS netwerk met een zonder Traffic Engineering. In beide gevallen is een MPLS configuratie vereist. Dat geldt dus ook voor de testnetwerken.

ad6. In Osborne & Simha (2002, p.82) wordt aangegeven dat MPLS Traffic Engineering alleen werkt indien MPLS Traffic Engineering op alle routers globaal geactiveerd wordt.

Unequal cost load sharing



Figuur 15. Voorbeeld unequal cost load sharing tussen tunnel 1 (blauw) en tunnel 2 (rood).

Hierna volgt de lijst met eisen aan het netwerk met Unequal cost load sharing. Onder deze lijst staat de toelichting op de eisen.
De eisen aan het netwerk met Unequal cost load sharing:

1. De verbindingen tussen R1, R2, R3, R4 en R5 moeten dezelfde bandbreedte hebben.
2. De route R1→R3→R5→R4 moet een 1.5 maal zo hoge cost hebben als de route R1→R2→R4.
3. Bij router R1 moet net zoveel dataverkeer aankomen als er totaal aan capaciteit beschikbaar is tussen R1 en R4. Dit is dus net zoveel dataverkeer als de routes R1→R2→R4 en R1→R3→R5→R4 samen kunnen verwerken.
4. In de situatie met MPLS Traffic Engineering dient een MPLS Traffic Engineering tunnel via de route R1→R2→R4 en een MPLS Traffic Engineering tunnel via de route R1→R3→R5→R4 aangebracht te worden.
5. In de situatie zonder MPLS Traffic Engineering dient aantoonbaar te zijn dat er geen dataverkeer gebruik maakt van de route R1→R3→R5→R4.
6. In de situatie zonder MPLS Traffic Engineering dient aantoonbaar te zijn hoeveel dataverkeer er bij R1 aankomt en hoeveel dataverkeer er in totaal bij R4 aankomt.
7. In de situatie met MPLS Traffic Engineering dient aantoonbaar te zijn hoeveel dataverkeer gebruik maakt van de route R1→R3→R5→R4 en hoeveel dataverkeer gebruik maakt van de route R1→R2→R4.
8. In de situatie met MPLS Traffic Engineering dient aantoonbaar te zijn hoeveel dataverkeer er bij R1 aankomt en hoeveel dataverkeer er in totaal bij R4 aankomt.

ad1. Het draait in het voorbeeld in hoofdstuk 8.1 om het gedeelte van het netwerk dat gevormd wordt door router R1, R2, R3, R4 en R5. De verbindingen tussen deze routers moeten dezelfde bandbreedte (ofwel snelheid) hebben. Deze eis hangt samen met de tweede eis.

ad2. Als alle verbindingen tussen R1, R2, R3, R4 en R5 dezelfde bandbreedte (ofwel snelheid) hebben, is de cost van al deze verbindingen ook gelijk. De route R1→R3→R5→R4 bestaat uit drie verbindingen en de route R1→R2→R4 bestaat uit twee verbindingen. Daardoor ontstaat automatisch een verhouding van 3:2 = 1.5 tussen de totale cost van route R1→R3→R5→R4 en route R1→R2→R4.

ad3. Zoals in hoofdstuk 8 uitgelegd is de totale beschikbare capaciteit gelijk aan de maximale hoeveelheid dataverkeer die tegelijkertijd tussen punt A en B getransporteerd kan worden. In

dit geval gaat het om transport tussen R1 en R4. De totale capaciteit is daarom gelijk aan de hoeveelheid data die via de route R1→R3→R5→R4 getransporteerd kan worden plus de hoeveelheid data die via de route R1→R2→R4 getransporteerd kan worden.

ad4. Het voorbeeld netwerk dat in hoofdstuk 8.1 beschreven wordt, maakt bij de situatie met MPLS Traffic Engineering gebruik van twee MPLS Traffic Engineering tunnels (via de genoemde routes). Deze tunnels dienen in de praktijk ook aangebracht te worden. Het gaat immers om het vergelijken van het netwerk zonder deze tunnels en het netwerk met deze tunnels.

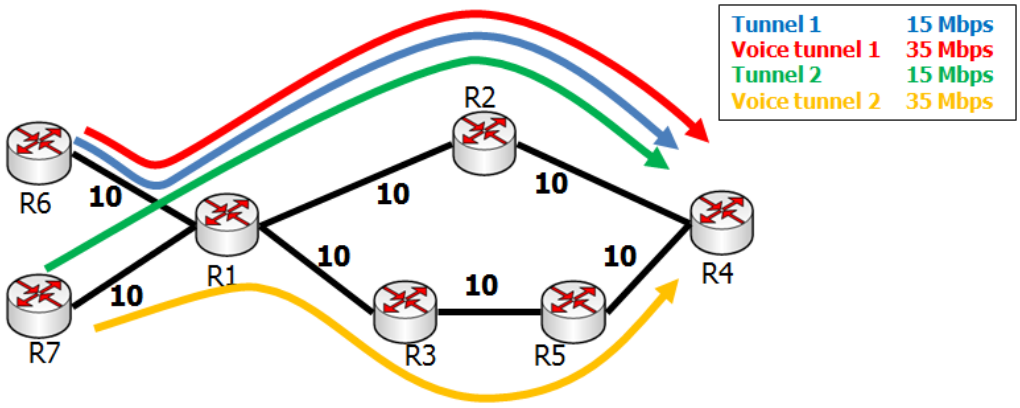
ad5. In de situatie zonder MPLS Traffic Engineering wordt in hoofdstuk 8.1 gesteld dat er geen dataverkeer gebruik maakt van de route R1→R3→R5→R4. Om te controleren of dit in de praktijk inderdaad niet gebeurt, zal dit door middel van testresultaten aangetoond moeten worden.

ad6. In dezelfde situatie als bij ad5 wordt gesteld dat er bij R1 een bepaalde hoeveelheid data wordt aangevoerd, waarvan slechts de helft aankomt bij R4. Middels testresultaten dient aangetoond te worden hoeveel data er bij R1 wordt aangevoerd en hoeveel data er bij R4 aankomt.

ad7. Het voorbeeld in hoofdstuk 8.1 stelt dat het dataverkeer in de situatie met MPLS Traffic Engineering zowel gebruik maakt van de route R1→R3→R5→R4 als van de route R1→R2→R4. Testresultaten dienen aan te tonen dat dit inderdaad zo is en ook hoeveel data er dan gebruikmaakt van beide routes.

ad8. Ook voor de situatie met MPLS Traffic Engineering dient middels testresultaten aangetoond te worden hoeveel data er bij R1 wordt aangevoerd en hoeveel data er bij R4 aankomt.

DiffServ Traffic Engineering



Figuur 16. Voorbeeld netwerk met DS-TE tunnels

Hierna volgt de lijst met eisen aan het netwerk met DiffServ Traffic Engineering . Onder deze lijst staat de toelichting op de eisen.

De eisen aan het netwerk met DiffServ Traffic Engineering:

1. De verbindingen tussen R1, R2, R3, R4, R5, R6 en R7 moeten dezelfde bandbreedte hebben.
2. De route R1→R3→R5→R4 moet een 1.5 maal zo hoge cost hebben als de route R1→R2→R4.

3. R6 en R7 dienen beiden dezelfde hoeveelheid data te versturen naar R4. Beide datastromen dienen voor 70% te bestaan uit verkeer met een hoge prioriteit (voice verkeer) en voor 30% uit verkeer met een lage prioriteit. Beide datastromen dienen gelijk te zijn aan de helft van de bandbreedte van de verbindingen tussen R1 t/m R7.
4. In de situatie met MPLS Traffic Engineering maar zonder DS-TE dienen twee tunnels aangebracht te worden. Eén tunnel van R6 naar R4 en één tunnel van R7 naar R4. De tunnelroutes dienen automatisch (met behulp van CSPF) bepaald te worden.
5. In de situatie met MPLS Traffic Engineering maar zonder DS-TE dient aangetoond te kunnen worden dat beide tunnels via de kortste route R1→R2→R4 lopen.
6. In de situatie met DS-TE dient op alle verbindingen tussen R1 t/m R7 geconfigureerd te worden dat maximaal 50% van de bandbreedte van de verbinding uit verkeer met een hoge prioriteit (voice verkeer) mag bestaan.
7. In de situatie met DS-TE dienen vier tunnels aangebracht te worden. Twee tunnels van R6 naar R4, waarvan één voor verkeer met een hoge prioriteit (voice tunnel) en één voor verkeer met een lage prioriteit. En ook twee tunnels van R7 naar R4, waarvan één voor verkeer met een hoge prioriteit (voice tunnel) en één voor verkeer met een lage prioriteit. Alle tunnelroutes dienen automatisch (met behulp van CSPF) bepaald te worden.
8. In de situatie met DS-TE dient aangetoond te kunnen worden dat de 'voice tunnel' voor verkeer met een hoge prioriteit van R7 via de langere route R1→R3→R5→R4 loopt. Tevens dient aangetoond te kunnen worden dat alle andere tunnels de kortste route via R1→R2→R4 kiezen. Alle tunnelroutes dienen automatisch (met behulp van CSPF) bepaald te worden, de voice tunnel van R7 dient als laatste te worden opgezet.
9. De delay van alle datapakketjes dient gemeten te kunnen worden.
10. Aangetoond dient te kunnen worden dat de delay van het voice verkeer in de situaties zonder DS-TE hoger is dan in de situatie met DS-TE.

ad1. Alle verbindingen tussen de genoemde routers moeten dezelfde bandbreedte (ofwel snelheid) hebben. Deze eis hangt samen met de tweede eis.

ad2. Als alle verbindingen tussen R1, R2, R3, R4 en R5 dezelfde bandbreedte (ofwel snelheid) hebben, is de cost van al deze verbindingen ook gelijk. De route R1→R3→R5→R4 bestaat uit drie verbindingen en de route R1→R2→R4 bestaat uit twee verbindingen. Daardoor ontstaat automatisch een verhouding van 3:2 = 1.5 tussen de totale cost van route R1→R3→R5→R4 en route R1→R2→R4.

ad3. De verhouding tussen verkeer met een hoge prioriteit en verkeer met een lage prioriteit is belangrijk voor de berekening van de totale effectiviteit. Dat de datastromen allebei gelijk zijn aan 50% van de bandbreedte van de verbindingen tussen R1 t/m R7 is ook belangrijk voor de gelijkenis met het beschreven voorbeeld. Dat betekent bijvoorbeeld dat de datastroom 1 Mbps moet zijn als de bandbreedte van de verbindingen tussen R1 t/m R7 2 Mbps is. Door deze eis wordt het percentage voice verkeer op de verbinding tussen R1 en R2 groter dan 50%, wat in het voorbeeld eveneens gesteld wordt.

ad4. Het voorbeeld netwerk dat in hoofdstuk 8.2 beschreven wordt, maakt bij de situatie met MPLS Traffic Engineering maar zonder DS-Traffic Engineering, gebruik van twee MPLS Traffic Engineering tunnels (via de genoemde routes). Deze tunnels dienen in de praktijk ook

aangebracht te worden. Het gaat immers om het vergelijken van het netwerk met deze tunnels en het netwerk met de DS-TE tunnels.

ad5. In de beschrijving van het voorbeeld met MPLS Traffic Engineering maar zonder DS-TE wordt gesteld dat beide tunnels via de kortste route R1→R2→R4 lopen. Dit dient door middel van testresultaten aangetoond te worden.

ad6. Het voorbeeld uit hoofdstuk 8.2 stelt dat de verbindingen tussen R1 t/m R7 maximaal 50% voice verkeer aankunnen. In de situatie met DS-TE kan dit percentage per verbinding opgegeven worden. Dat brengt de praktijk in overeenstemming met het voorbeeld.

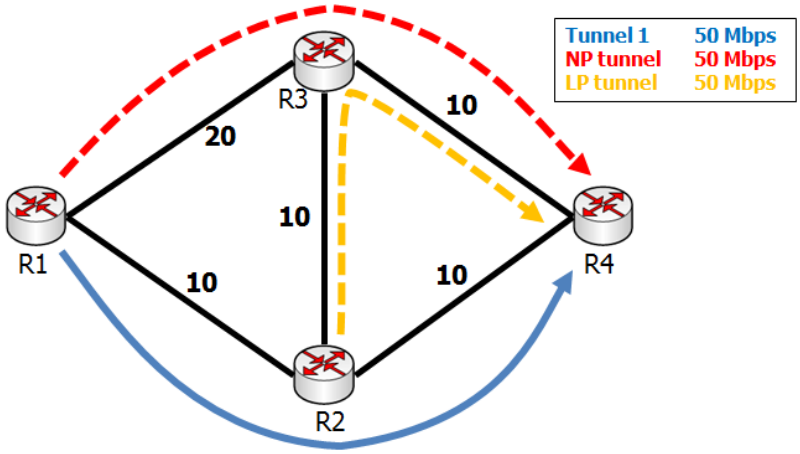
ad7. Net als bij ad4 is het ook in de situatie met DS-TE tunnels belangrijk dat de tunnels uit het voorbeeld in de praktijk ook aangebracht worden.

ad8. Er wordt in het voorbeeld gesteld dat alle tunnels, behalve de voice tunnel van R7, automatisch de kortste route via R1→R2→R4 kiezen. Tevens wordt gesteld dat de 'voice tunnel' voor verkeer met een hoge prioriteit van R7 automatisch via de langere route R1→R3→R5→R4 komt te lopen, mits de voice tunnel van R7 als laatste wordt opgezet. Middels testresultaten zal aangetoond moeten worden dat dit in de praktijk inderdaad zo is.

ad9. Er worden in het voorbeeld uitspraken gedaan over de delay van pakketjes. Om iets over deze uitspraken te kunnen zeggen, dient de delay van de pakketjes gemeten te worden.

ad10. Er wordt gesteld dat de delay van het voice verkeer in de situaties zonder DS-TE hoger is dan in de situatie met DS-TE. Testresultaten zullen uit moeten wijzen of dit in de praktijk ook daadwerkelijk zo is.

Recovery en Protection



Figuur 17. Voorbeeld netwerk met Link Protection en Node Protection

Hierna volgt de lijst met eisen aan het netwerk met Recovery en Protection. Onder deze lijst staat de toelichting op de eisen.

De eisen aan het netwerk met Recovery en Protection:

1. De totale cost van de route R1→R2→R4 dient lager te zijn dan de totale cost van de route R1→R3→R4 en de route R1→R2→R3→R4.
2. De bandbreedte van alle verbindingen in het netwerk dient groter of gelijk te zijn aan de bandbreedte die nodig is voor de Tunnel 1 (figuur 17).

3. In de situatie met Fast Reroute dient een normale MPLS Traffic Engineering tunnel aangebracht te worden tussen R1→R2→R4. Daarnaast dient er een Link Protection tunnel aangebracht te worden tussen R2→R3→R4 en een Node Protection tunnel tussen R1→R3→R4. De bandbreedte van al deze tunnels moet gelijk zijn.
4. In de situatie met Fast Reroute dient aangetoond te kunnen worden dat gebruik gemaakt wordt van de Link Protection tunnel bij uitval van de verbinding tussen R2 en R4 en van de Node Protection tunnel bij uitval van de router R2.
5. Er dient aangetoond te kunnen worden hoe lang de capaciteit niet gebruikt wordt na uitval van een verbinding of router.

ad1. De eis is bedoeld om ervoor te zorgen dat de route R1→R2→R4 door (C)SPF als snelste wordt gekozen. Zowel SPF als CSPF prefereren de route met de laagste cost. Bij CSPF zijn er zoals in hoofdstuk 5 uitgelegd nog wel enkele aanvullende voorwaarden, eis 2 zorgt ervoor dat aan die voorwaarden wordt voldaan. Als de route R1→R2→R4 dus de laagste cost heeft wordt daarmee wordt bereikt dat al het verkeer van R1 naar R4 zowel met als zonder MPLS Traffic Engineering via deze route loopt. Hierdoor wordt in de praktijk dezelfde situatie gecreëerd als in het voorbeeld van hoofdstuk 8.3. Al het verkeer dient deze route te volgen omdat Link Protection en Node Protection op deze route anders geen zin hebben. Als er geen verkeer over de route gaat, kan het keer ook niet omgeleid worden en kan het beschreven voorbeeld niet in de praktijk getest worden.

ad2. Tunnel 1 reserveert een bepaalde bandbreedte. Dezelfde bandbreedte wordt ook door de Link Protection tunnel en de Node Protection tunnel gereserveerd. Bij eis 3 is aangegeven welke route de tunnels moeten volgen. Door de aangegeven tunnelroutes worden alle verbindingen in het netwerk door één of meerdere van de tunnels gebruikt (niet gelijktijdig). Als een verbinding te weinig bandbreedte heeft, kan deze niet door een tunnel worden gebruikt. Om te voorkomen dat die situatie optreedt, moeten alle verbindingen dus minimaal gelijk zijn aan de bandbreedte van Tunnel 1.

ad3. Het voorbeeld netwerk dat in hoofdstuk 8.2 beschreven wordt, maakt bij de situatie met MPLS Traffic Engineering gebruik van één normale MPLS Traffic Engineering tunnel, één Link Protection tunnel en één Node Protection tunnel. Deze tunnels dienen in de praktijk ook aangebracht te worden. Het gaat immers om het vergelijken van het netwerk met deze tunnels en het netwerk zonder deze tunnels.

ad4. In het voorbeeld wordt gesteld dat in de situatie met Fast Reroute gebruik gemaakt wordt van de Link Protection tunnel bij uitval van de verbinding tussen R2 en R4 en van de Node Protection tunnel bij uitval van de router R2. Dit dient door middel van testresultaten aangetoond te worden.

ad5. In het voorbeeld wordt gesteld dat het in de situatie zonder MPLS Traffic Engineering Fast Reroute na uitval van een verbinding of router langer duurt voordat de beschikbare capaciteit weer gebruikt wordt dan in de situatie met MPLS Traffic Engineering Fast Reroute. Om met behulp van testresultaten aan te kunnen tonen of dat inderdaad zo is, dient dus de tijd gemeten te kunnen worden dat de beschikbare capaciteit niet gebruikt wordt na uitval van een verbinding of router.

9.3 Netwerkontwerpen

Hierna wordt eerst een aantal algemene punten toegelicht. Daarna worden de netwerkontwerpen van Unequal cost load sharing, DiffServ Traffic Engineering en Recovery en Protection besproken.

Gebruik OSPF voor alle testnetwerken

In hoofdstuk 9.2 bij de algemene eisen werd al aangegeven dat alle testnetwerken gebruik dienen te maken van OSPF of IS-IS. In Osborne & Simha (2002, p.82) wordt aangegeven dat de meeste configuratie opties door beide routing protocollen worden ondersteund. Op enkele plaatsen wordt aangegeven dat bepaalde configuratie opties alleen door OSPF of IS-IS worden ondersteund. Deze configuratie opties zijn niet nodig voor de testnetwerken. Voor de testnetwerken maakt het dus niet uit welk routing protocol gebruikt wordt. Omdat de afstudeerder beter bekend is met OSPF dan IS-IS, is voor OSPF als routing protocol gekozen. Binnen OSPF worden alle routers in area 0 geplaatst. Het gebruik van meerdere area's voor de testnetwerken zou de ontwerpen nodeloos ingewikkeld maken.

Gebruik loopback interface als router ID

Zoals bij de algemene eisen aangegeven, is het gebruik van een loopback interface noodzakelijk voor het kunnen gebruiken van MPLS Traffic Engineering. In alle netwerkontwerpen wordt voor elke router een loopback interface aangemaakt. Het ip adress is daarbij duidelijk herkenbaar, voor R1 wordt 1.1.1.1 gebruikt, voor R2 2.2.2.2 enz.

Gebruik CEF en MPLS (Traffic Engineering)

Zoals eveneens bij de algemene eisen aangegeven, is het gebruik van Cisco Express Forwarding en MPLS een vereiste voor alle routers (de Pagent routers uitgezonderd). In alle netwerkontwerpen wordt CEF en MPLS geactiveerd. Voor het gebruik van MPLS Traffic Engineering is het activeren van MPLS Traffic Engineering op alle routers noodzakelijk. In alle netwerkontwerpen wordt MPLS Traffic Engineering dus geactiveerd in de situatie met MPLS Traffic Engineering.

Gebruik Pagent routers

Zoals in hoofdstuk 9.1 genoemd, zijn er in het Cisco laboratorium ook Pagent routers aanwezig. Dat zijn routers met een Pagent module, met deze module kan dataverkeer gegenereerd worden. Hoe dit dataverkeer er uit moet zien is vrijwel volledig instelbaar. Zo kan bijvoorbeeld ingesteld worden hoe groot (in bytes) de pakketjes moeten zijn en hoeveel pakketjes per seconden er verstuurd moeten worden. Tevens zijn alle headers (bijv. Ethernet, IP en TCP header) instelbaar. In de IP header kunnen onder andere het source en destination IP adres en de prioriteit van het pakketje worden ingesteld. Met één Pagent module kunnen meerdere verschillende verkeerstromen (flows) tegelijk worden gegenereerd.

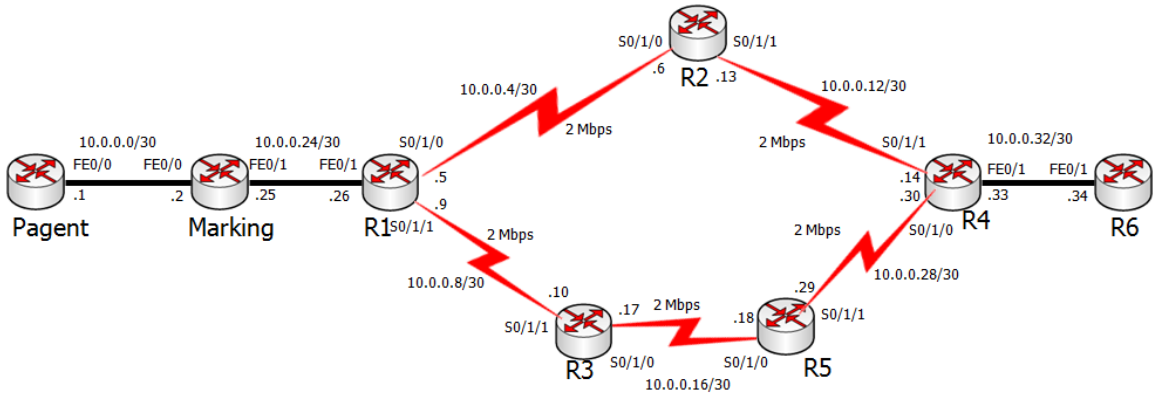
Naast deze opties kan de Pagent module ook gebruikt worden voor Quality of Service metingen. Daarbij worden de pakketjes niet alleen verstuurd vanaf de Pagent router, maar ook weer opgevangen door de Pagent router. Van deze pakketjes wordt de in het netwerk opgelopen delay

gemeten. Tevens wordt bijgehouden of er pakketjes gedropt zijn in het netwerk. De delay en drop statistieken kunnen per flow worden bekeken op de Pagent router.

Bij de verschillende netwerkontwerpen is telkens gebruik gemaakt van één of meerdere Pagent routers. Met welke doel de Pagent routers zijn ingezet, wordt per ontwerp toegelicht. Opgemerkt wordt dat de beschikbare documentatie van de Pagent module zeer summier was. Daarom is de Pagent handleiding opgevraagd bij de beheerder van het HHS Cisco laboratorium. Deze handleiding maakte veel duidelijk over het gebruik van de Pagent module. Tijdens het ontwerp en de testen van Unequal cost load sharing, was de handleiding echter nog niet beschikbaar. Daarom zijn de mogelijkheden van de Pagent router bij Unequal cost load sharing niet volledig benut.

Unequal cost load sharing

In figuur 18 wordt het netwerkontwerp voor Unequal cost load sharing weergegeven (een groter formaat van deze figuur is te vinden in externe bijlage Netwerkconfiguraties). Onder de figuur wordt het netwerkontwerp nader toegelicht.



Figuur 18. Netwerkontwerp voor Unequal cost load sharing

De Pagent router is van het type 2621, alle overige routers zijn van het type 2801. Op alle routers wordt OSPF gebruikt als routing protocol. Op router R1 t/m R5 wordt naast OSPF ook MPLS geactiveerd. Het draait bij dit netwerkontwerp allemaal om de datastromen tussen de routers R1 t/m R5. De routers Pagent, Marking en R6 zijn toegevoegd om de testen ten behoeve van het bepalen van de totale effectieve benutting mogelijk te maken of te vergemakkelijk.

Alle verbindingen tussen R1, R2, R3, R4 en R5 hebben dezelfde bandbreedte (2 Mbps), daarmee wordt aan de eerste ontwerpeis voldaan. Omdat OSPF de cost bepaalt op basis van de bandbreedte hebben alle verbindingen ook dezelfde cost. Hierdoor wordt aan de tweede ontwerpeis voldaan. In het voorbeeld in hoofdstuk 8.1 stuurden twee routers (R6 en R7) data naar R1. Dat het dataverkeer afkomstig is van twee routers is verder niet relevant voor de totale effectieve benutting. Zoals uitgelegd in hoofdstuk 8.1 gaat het erom hoe deze data van R1 naar R4 verstuurd wordt en niet waar deze data vandaan komt. Daarom is in dit netwerkontwerp gebruik gemaakt van één Pagent router die al het dataverkeer genereert. Al het door de Pagent gegenereerde dataverkeer wordt verstuurd naar ip adres 6.6.6.6. Dit is het ip adres van de loopback0 interface op router R6. De gebruikte Pagent router genereerde bij een testmeting

ca. 12 Mbps. Vanwege de derde ontwerpeis mag de bandbreedte van de verbindingen tussen R1 t/m R5 niet groter zijn dan 6 Mbps. Bij een bandbreedte groter dan 6 Mbps wordt de totale beschikbare capaciteit tussen R1 en R4 hoger dan 12 Mbps en wordt niet meer voldaan aan de ontwerpeis. In dat geval zou de Pagent router te weinig verkeer genereren om 100% van de beschikbare capaciteit te kunnen gebruiken. Besloten is om een veilige marge aan te houden ten opzichte van de maximaal toegestane bandbreedte van 6 Mbps. Daarom is gekozen voor 2 Mbps, wat de totale beschikbare capaciteit op 2+2=4 Mbps brengt.

De router Marking in het ontwerp wordt gebruikt om de 12 Mbps die door de Pagent router gegenereerd wordt, terug te brengen naar 4 Mbps. Dit wordt gedaan door policing op interface FastEthernet 0/1 (FE). Hierdoor wordt voldaan aan de derde ontwerpeis. Er komt hierdoor immers 4 Mbps aan bij router R1 en 4 Mbps is gelijk aan de totale capaciteit. Zoals aangegeven was de handleiding van de Pagent module ten tijde van het opstellen van dit ontwerp niet beschikbaar. Als deze wel beschikbaar was geweest, zouden de routers Marking en R6 weggelaten zijn in het ontwerp. In dat geval was de Pagent module zo ingesteld dat deze precies de benodigde hoeveelheid data van 4 Mbps zou genereren. Daarmee zou de router Marking overbodig worden. Ook zou in dat geval een verbinding worden aangebracht van router R4 terug naar de Pagent router. Door deze verbindingen zou het mogelijk zijn om op de Pagent router te bepalen hoeveel van de gegenereerde 4 Mbps aan dataverkeer er bij R4 het netwerk weer verlaat. Voor het doel van dit testnetwerk, namelijk aantonen van de datastromen en de totale effectieve benutting, maakt dit alles niets uit.

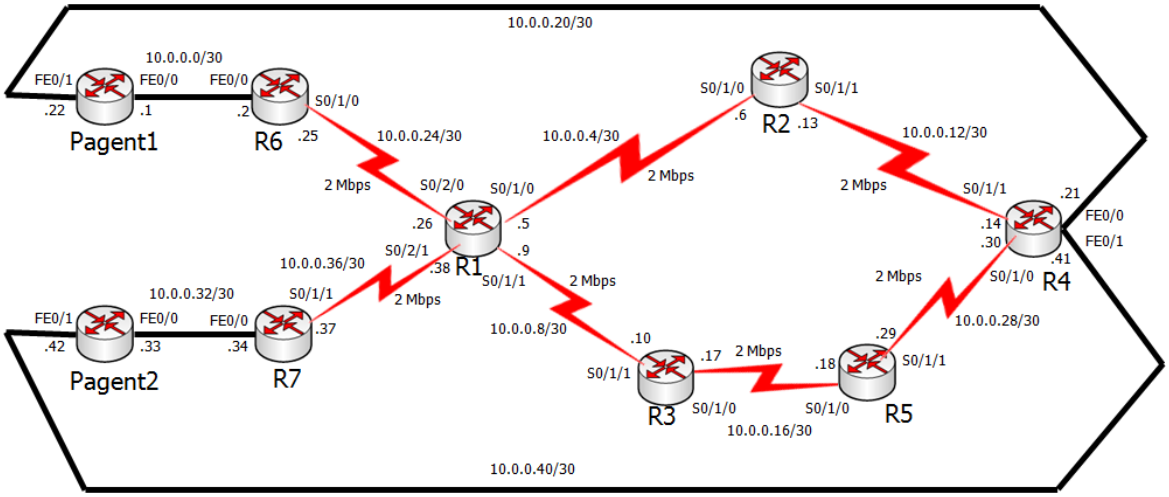
In de situatie met MPLS Traffic Engineering wordt MPLS Traffic Engineering geactiveerd op router R1 t/m R5. Tevens worden twee MPLS Traffic Engineering tunnels aangebracht. Eén MPLS Traffic Engineering tunnel via de route R1→R2→R4 en één MPLS Traffic Engineering tunnel via de route R1→R3→R5→R4. Met het commando 'show mpls traffic-eng tunnels' wordt de route van de MPLS Traffic Engineering tunnels getoond. Daarmee wordt aan de vierde ontwerpeis voldaan.

De eisen 5 t/m 8 hebben allemaal betrekking op het aantoonbaar maken van datastromen tussen R1 t/m R5. Deze datastromen worden zowel in de situatie met als zonder MPLS Traffic Engineering inzichtelijk gemaakt door show interface commando's. Wanneer bijvoorbeeld op router R2 het commando 'show interface S0/1/0' wordt gegeven, wordt de hoeveelheid data getoond die deze interface verstuurd en ontvangen heeft. Door dit commando op alle aangesloten interfaces van R1 t/m R5 te geven, wordt precies duidelijk hoeveel data er over de verbindingen tussen de routers verstuurd wordt. Door dit commando op interface FE0/1 van router R6 te geven, wordt in een oogopslag duidelijk hoeveel van de gegenereerde 4 Mbps er bij R6 aankomt.

Met dit ontwerp en de gegeven commando's zou het mogelijk moeten zijn om het voorbeeld uit hoofdstuk 8.1 in de praktijk te testen.

DiffServ Traffic Engineering

In figuur 19 wordt het netwerkontwerp voor DiffServ Traffic Engineering weergegeven (een groter formaat van deze figuur is te vinden in externe bijlage Netwerkconfiguraties). Onder de figuur wordt het netwerkontwerp nader toegelicht.



Figuur 19. Netwerkontwerp DiffServ Traffic Engineering.

Beide Pagent routers zijn van het type 2621, alle overige routers zijn van het type 2801. Op alle routers wordt OSPF gebruikt als routing protocol. Op router R1 t/m R7 wordt naast OSPF ook MPLS geactiveerd. Alle verbindingen tussen R1 t/m R7 hebben dezelfde bandbreedte (2 Mbps), daarmee wordt aan de eerste ontwerpeis voldaan. Omdat OSPF de cost bepaalt op basis van de bandbreedte hebben alle verbindingen ook dezelfde cost. Hierdoor wordt aan de tweede ontwerpeis voldaan.

Router Pagent1 stuurt 1 Mbps naar router R6. Deze 1 Mbps bestaat voor 30% (300 kbps) uit verkeer met een lage prioriteit en voor 70% (700 kbps) uit verkeer met een hoge prioriteit. Router Pagent 2 stuurt 1 Mbps met dezelfde samenstelling naar router R7. Daarmee wordt aan de derde ontwerpeis voldaan. De pakketjes die vanaf de Pagent1 router verstuurd worden, verlaten de Pagent1 router via interface FE0/0 en hebben 10.0.0.22 als destination ip adres. Zonder extra configuratie zouden de pakketjes, na aankomst op router R6, op basis van SPF direct weer terug gestuurd worden naar de Pagent1 router. Dat is immers de kortste route vanaf R6 naar ip adres 10.0.0.22 (interface FE0/1 op de Pagent1 router). Voor de testen moeten de pakketjes echter door het netwerk worden gestuurd, dus naar R4 en dan via de FastEthernet 0/0 interface van R4 weer terug naar de Pagent1 router. Om te voorkomen dat dit gebeurt, wordt op interface FE 0/0 van router R6 het commando 'ip ospf cost 10000' gegeven. Hierdoor krijgt de verbinding R6→Pagent1 een cost van 10.000, deze cost wordt door SPF gebruikt voor het bepalen van de kortste route. Omdat deze kost veel hoger is dan de cost van de route R6→R1→R2→R4→Pagent1 krijgt deze laatste route de voorkeur. Daardoor wordt dus bereikt dat het verkeer door het netwerk wordt gestuurd. Voor de pakketjes die vanaf de router Pagent2 verstuurd worden, geldt hetzelfde verhaal. Op interface FE0/0 van router R7 dient het commando 'ip ospf cost 10000' dus ook gegeven te worden.

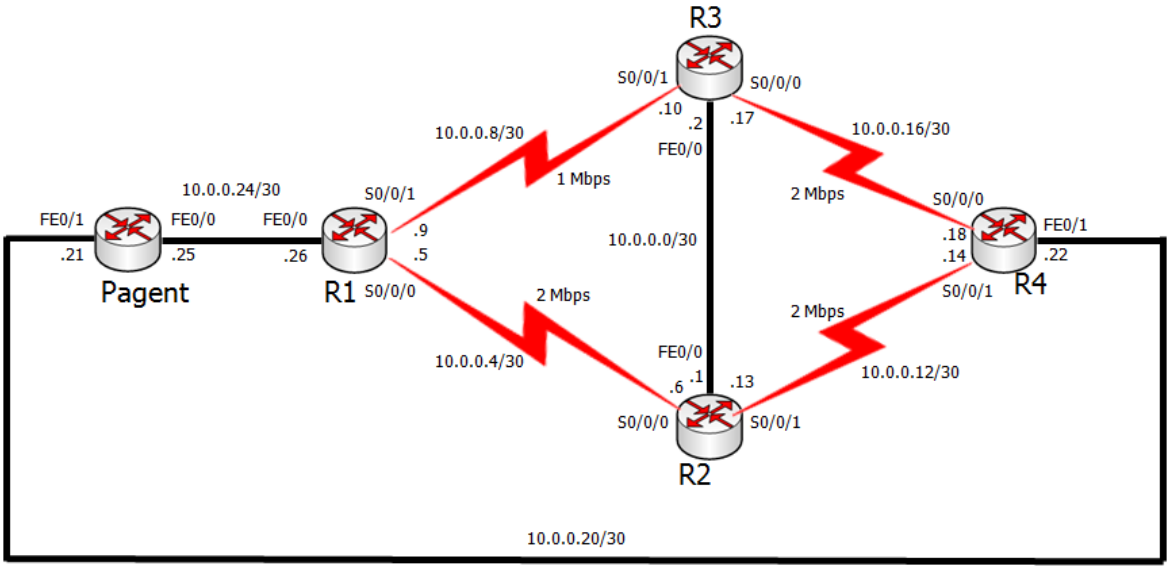
In de situatie met MPLS Traffic Engineering maar zonder DS-TE wordt op router R1 t/m R7 MPLS Traffic Engineering geactiveerd. Daarbij worden er twee tunnels aangebracht, één tunnel van R6 naar R4 en één tunnel van R7 naar R4. De tunnels worden zo geconfigureerd dat de route ervan automatisch (met behulp van CSPF) wordt bepaald. Daarmee wordt aan de vierde ontwerpeis voldaan. Met het commando 'show mpls traffic-eng tunnels' op router R6 en R7 wordt aangetoond dat de tunnelpaden via de kortste route (R1→R2→R4) lopen. Waardoor aan de vijfde ontwerp eis wordt voldaan. Aan de zesde eis kan worden voldaan door op alle interfaces van de verbindingen tussen R1 t/m R7 het commando 'ip rsvp bandwidth 2000 sub-pool 1000' te geven. Het commando geeft aan dat er in totaal maximaal 2000 kbps (2 Mbps) gereserveerd kan worden. De maximale bandbreedte die gereserveerd kan worden door verkeer met een hoge prioriteit is 1000 kbps, ofwel 1 Mbps, wat gelijk is aan 50% van de totale bandbreedte.

In de situatie met DS-TE worden vier tunnels aangebracht. Twee tunnels van R6 naar R4, waarvan één voor verkeer met een hoge prioriteit (voice tunnel) en één voor verkeer met een lage prioriteit. En ook twee tunnels van R7 naar R4, waarvan één voor verkeer met een hoge prioriteit (voice tunnel) en één voor verkeer met een lage prioriteit. De voice tunnel van R7 dient als laatste te worden opgezet. De tunnels worden zo geconfigureerd dat de route ervan automatisch (met behulp van CSPF) wordt bepaald. Daarmee wordt aan de zevende ontwerpeis voldaan. De route van de tunnels kan gecontroleerd worden door middel van het commando 'show mpls traffic-eng tunnels' op R6 en R7. Hiermee wordt aan de achtste eis voldaan.

De negende en tiende eis hebben betrekking op het meten van de delay van de pakketjes. Hiervoor wordt in het ontwerp gebruik gemaakt van de routers Pagent1 en Pagent2. Deze routers versturen en ontvangen beiden een datastroom van 1 Mbps, die onderverdeeld is in verkeer met een hoge en verkeer met een lage prioriteit. Van de pakketjes in deze datastroom kunnen delay statistieken bekeken worden. Hiermee kan dus worden vastgesteld of de delay van het voice verkeer in de situaties zonder DS-TE hoger is dan in de situatie met DS-TE.

MPLS Traffic Engineering Recovery en Protection

In figuur 20 wordt het netwerkontwerp voor MPLS Traffic Engineering Recovery en Protection weergegeven (een groter formaat van deze figuur is te vinden in externe bijlage Netwerkconfiguraties). Onder de figuur wordt het netwerkontwerp nader toegelicht.



Figuur 20. Netwerkontwerp voor MPLS Traffic Engineering Recovery en Protection.

De keuze voor de in figuur 20 aangegeven bandbreedtes zorgt ervoor dat aan de eerste ontwerpeis wordt voldaan. De totale cost van de route R1→R2→R4 is met de aangegeven bandbreedtes lager dan de totale cost van de route R1→R3→R4 en de route R1→R2→R3→R4. In de situatie met MPLS Traffic Engineering wordt MPLS Traffic Engineering geactiveerd op router R1 t/m R4. In die situatie wordt tevens een normale MPLS Traffic Engineering tunnel aangebracht tussen R1→R2→R4. Daarnaast wordt er een Link Protection tunnel aangebracht tussen R2→R3→R4 en een Node Protection tunnel tussen R1→R3→R4. De bandbreedte van al deze tunnels is 1 Mbps. Daarmee wordt voldaan aan de tweede en derde ontwerpeis.

Er zijn meerdere manieren om aan te tonen dat de Link Protection tunnel gebruikt wordt bij uitval van de verbinding tussen R2 en R4. De eerste manier is via het commando 'traceroute 4.4.4.4' op router R1. Dit commando laat de route zien die op dat moment gebruikt wordt tussen R1 en R4 (4.4.4.4 is het ip adres van R4). Een ander commando dat gebruikt kan worden is 'show mpls traffic-eng fast-reroute database' op router R2. Als dit commando gegeven wordt op het moment dat de verbinding uitgevallen is, wordt bij de Link Protection tunnel de status 'active' weergegeven. Voor de Node Protection tunnel kunnen dezelfde commando's gebruikt worden, het 'show mpls traffic-eng fast-reroute database' commando dient dan wel op router R1 gegeven te worden.

De tijd dat de beschikbare capaciteit niet gebruikt wordt, zal bepaald worden met behulp van de Pagent router. Daarbij worden bijvoorbeeld gedurende 20 seconden 100 pakketjes per seconde van de Pagent router via R1 door het netwerk naar R4 en dan via de FastEthernet 0/1 interface van R4 weer terug naar de Pagent gestuurd. Van deze pakketjes wordt bijgehouden hoeveel

pakketjes er gedropt worden. Daarmee kan uitgerekend worden hoe lang de capaciteit niet gebruikt wordt. Ieder pakketje dat gedropt wordt, betekent dat de capaciteit 1/100 seconde niet gebruikt werd. De pakketjes die vanaf de Pagent router verstuurd worden, verlaten de Pagent router via interface FE0/0 en hebben 10.0.0.21 als destination ip adres. Zonder extra configuratie zouden de pakketjes, na aankomst op router R1, op basis van SPF direct weer terug gestuurd worden naar de Pagent router. Dat is immers de kortste route vanaf R1 naar ip adres 10.0.0.21 (interface FE0/1 op de Pagent router). Voor de testen moeten de pakketjes echter door het netwerk worden gestuurd, dus naar R4 en dan via de FastEthernet 0/1 interface van R4 weer terug naar de Pagent router. Om te voorkomen dat dit gebeurt, wordt op interface FE 0/1 van router R1 het commando 'ip ospf cost 10000' gegeven. Hierdoor krijgt de verbinding R1→Pagent een cost van 10.000, deze cost wordt door SPF gebruikt voor het bepalen van de kortste route. Omdat deze kost veel hoger is dan de cost van de route R1→R2→R4→Pagent krijgt deze laatste route de voorkeur. Daardoor wordt dus bereikt dat het verkeer door het netwerk wordt gestuurd.

9.4 Testresultaten

In de Testrapportage (externe bijlage) zijn de complete testbeschrijvingen en testresultaten te vinden. In dit hoofdstuk wordt kort ingegaan op de testresultaten. Tevens wordt bekeken of de resultaten aan de verwachting hebben voldaan. De testresultaten worden hierna per testnetwerk besproken.

Testen netwerk met Unequal cost load sharing

De eerste test was erop gericht de datastromen in de situatie zonder MPLS Traffic Engineering inzichtelijk te maken. De verwachting was dat de route R1→R3→R5→R4 niet gebruikt zou worden, waardoor er in totaal slechts 2 Mbps aan data bij R4 aan zou komen. De testresultaten wezen uit dat er op de route R1→R3→R5→R4 geen dataverkeer was. In totaal kwam er ca. 1.97 Mbps aan data bij R4 aan. Dit voldoet aan de verwachting, zeker gezien de bepalingsmethode die gebruikt is. De datahoeveelheden zijn afgeleid middels show interface commando's. De output hiervan is niet heel nauwkeurig.

De tweede test was erop gericht de datastromen in de situatie met MPLS Traffic Engineering inzichtelijk te maken. De verwachting was dat in deze situatie zowel de route R1→R2→R4 als de route R1→R3→R5→R4 gebruikt zouden worden, waardoor er in totaal 4 Mbps aan data bij R4 aan zou komen. De testresultaten wezen uit dat er inderdaad op beide routes dataverkeer was. In totaal kwam er ca. 3.89 Mbps aan data bij R4 aan. Dat voldeed niet helemaal aan de verwachting, de datastroom via R1→R2→R4 voldeed aan de verwachting, deze week maximaal 2.0% af van de verwachte 2 Mbps. De datastroom via R1→R3→R5→R4 week echter ca. 5% af, dat was meer verwacht. Een gedeeltelijke verklaring voor de afwijking is gevonden via de commando's show interface tunnel1 en show interface tunnel2. Die laten zien dat er 2149000 bits/sec naar tunnel1 worden gestuurd en 1869000 bits/sec naar tunnel2. Tunnel1 loopt via R1→R2→R4 en tunnel2 via R1→R3→R5→R4. Daarmee is de afwijking verklaard. De vraag blijft hoe het komt dat de 4 Mbps niet precies gelijk wordt verdeeld over beide routes. Dit heeft waarschijnlijk te maken met de precieze manier waarop het load sharing plaatsvindt. Mogelijk zou dit voorkomen kunnen worden door de Pagent router twee afzonderlijke datastromen (flows) te laten genereren. Standaard

wordt load sharing per flow toegepast, daarbij is elke afzonderlijke combinatie van source en destination ip adres één flow. Deze flows worden verdeeld over 16 verschillende rijen. Bij twee flows zouden beide tunnels dus 8 rijen toebedeeld moeten krijgen waardoor de data precies gelijk wordt verdeeld. Omdat er in het testnetwerk slechts 1 flow was, is gebruik gemaakt van 'per packet load sharing'. Op één flow wordt normaal gesproken geen load sharing toegepast. Reden hiervoor is dat de pakketjes in die flow mogelijk 'uit volgorde' bij de bestemming aankomen omdat de ene route sneller kan zijn dan de andere. De precieze werking van per packet load sharing wordt niet beschreven in de gebruikte literatuur. Aanvullende informatie hierover is wegens tijdgebrek niet meer gezocht.

De derde en laatste test was erop gericht om de route van de tunnels in de situatie met MPLS Traffic Engineering aan te tonen. Belangrijk voor de werking van de technieken is dat de route van de ene tunnel via R1→R2→R4 loopt en dat de route van de andere tunnel via R1→R3→R5→R4 loopt. Het resultaat van de test heeft uitgewezen dat dit inderdaad het geval is.

Ondanks de kleine afwijking bij de tweede test, is de werking van Unequal cost load sharing aangetoond. Als het uitgangspunt is dat er over een 2 Mbps verbinding niet meer data kan dan de 1.97 Mbps die in de test zonder MPLS Traffic Engineering gevonden werd. Dan zou dat betekenen dat 1.97 Mbps gelijk is aan de 50% totale effectieve benutting uit het voorbeeld in hoofdstuk 8.1. Zonder de genoemde kleine afwijking zou de test met MPLS Traffic Engineering overeenkomen met het voorbeeld. Met de afwijking komt de situatie met MPLS Traffic Engineering op 85.6% (in het voorbeeld 87.5%). Dat is nog steeds slechts 1.9% lager dan het voorbeeld en bovendien nog steeds een veel effectievere benutting dan de situatie zonder MPLS Traffic Engineering (50%).

Testen netwerk DiffServ Traffic Engineering

De eerste test is bedoeld om de delay in de situatie zonder MPLS Traffic Engineering in kaart te brengen. De verwachting is dat alle data via de route R1→R2→R4 zal lopen, waardoor het percentage verkeer met een hoge prioriteit (delay gevoelig verkeer) op die route te hoog wordt. Door dit hoge percentage zou de delay van de pakketjes te hoog, of in ieder geval hoger, moeten worden dan bij een lager percentage delay gevoelig verkeer op de verbinding. Er zijn resultaten met drie verschillende datastromen. De datastromen van Pagent1 en Pagent2 zijn bij de eerste test constant en samen precies gelijk aan de capaciteit van de route R1→R2→R4 (2 Mbps). Bij de tweede en derde test is de datastroom niet constant. In de tweede test is het moment waarop het pakketje verzonden wordt variabel, de totale datastroom blijft echter wel 1 Mbps. Verwacht wordt dat de delay hierdoor toeneemt, omdat er nu af toe meer data tegelijk bij R2 aankomt dan de verbinding aan kan. Daardoor moet het data overschot tijdelijk gebufferd worden, wat extra delay oplevert. Bij de derde meting wordt een soortgelijk effect verwacht. De pakketgrootte (lengte) van de datastroom van Pagent2 wordt gevarieerd tussen 40 Bytes en 80 Bytes, wat gemiddeld genomen gelijk is aan de 60 Bytes van de datastroom die bij de eerste meting gebruikt werd. Door de variabele pakketgrootte komt er af en toe meer data bij R2 aan dan de verbinding aan kan. Daardoor moet het data overschot tijdelijk gebufferd worden, wat extra delay oplevert. De delay van het delay gevoelig verkeer van de eerste, tweede en derde datastroom is respectievelijk 5.6 ms, 8.4 ms en 24.4 ms (milliseconde). Daarmee wordt aan de verwachting voldaan.

De tweede test is vrijwel gelijk aan de eerste. Het gaat bij de tweede test om de situatie met MPLS Traffic Engineering maar zonder DiffServ Traffic Engineering. Omdat de verwachting is dat ook bij deze situatie al het verkeer via de route R1→R2→R4 loopt, worden dezelfde delays verwacht als bij de eerste test. De resultaten van de tweede test komen redelijk overeen met die van de eerste test. De delay van het delay gevoelig verkeer van de eerste, tweede en derde datastroom is respectievelijk 5.5 ms, 7.3 ms en 25.3 ms (milliseconde). De delay van de tweede datastroom is wel 1.1 ms lager dan bij de vorige test. Dat zou kunnen komen doordat de variability (die random is) wat anders uitpakt bij deze test. Daarmee wordt ook bij deze tweede test aan de verwachting voldaan.

De derde test was bedoeld om te bepalen welke route de tunnels in de situatie met MPLS Traffic Engineering maar zonder DiffServ Traffic Engineering kiezen. De verwachting was dat beide tunnels automatisch (op basis van CSPF) de route via R1→R2→R4 zouden kiezen. De testresultaten hebben aangetoond dat dit inderdaad zo is. Er wordt dus aan de verwachting voldaan.

De vierde test had als doel om te bepalen hoe groot de delay in de situatie met DiffServ Traffic Engineering was. De verwachting was dat de delay lager zou zijn dan in de eerste twee situaties. Reden hiervoor is dat de DiffServ Traffic Engineering ervoor zorgt dat het percentage delay gevoelig verkeer op de route R1→R2→R4 niet te hoog wordt. DiffServ Traffic Engineering zorgt er namelijk voor dat het delay gevoelig verkeer van router R7 via de route R1→R3→R5→R4 wordt gestuurd. De testresultaten tonen aan dat de delay van het delay gevoelig verkeer via de route R1→R2→R4 van de eerste, tweede en derde datastroom respectievelijk 4.5 ms, 4.3 ms en 4.3 ms (milliseconde) is. De delay van het delay gevoelig verkeer via de route R1→R3→R5→R4 van de eerste, tweede en derde datastroom is respectievelijk 5.7 ms, 5.9 ms en 5.9 ms (milliseconde). Het verkeer op de langere route loopt, door de omweg, iets meer delay op.

De vijfde test was bedoeld om te bepalen welke route de tunnels in de situatie met DiffServ Traffic Engineering kiezen. De verwachting was dat alle tunnels, behalve de voice tunnel van R7 automatisch (op basis van CSPF) de route via R1→R2→R4 zouden kiezen. De voice tunnel zou de route via R1→R3→R5→R4 kiezen. De testresultaten hebben aangetoond dat dit inderdaad zo is. Er wordt dus aan de verwachting voldaan.

Het belangrijkste doel van DiffServ Traffic Engineering is om mogelijk te maken dat bepaalde verbindingen niet of slechts gedeeltelijk door delay gevoelig verkeer kunnen worden gereserveerd. Dat DiffServ Traffic Engineering werkt, wordt aangetoond door de route die de voice tunnel van R7 automatisch kiest. Daarmee is het belangrijkste doel bereikt. Toch zijn de testen niet geheel naar tevredenheid uitgevoerd. In Davie & Farrel (2008, p.126) wordt een voorbeeld beschreven waarbij het effect van de verhoogde delay van het voice verkeer als gevolg van een te hoog percentage voice verkeer op een verbinding ook optreedt als de capaciteit van de verbinding niet maximaal gebruikt wordt. Dat voorbeeld gaat uit van een 2.5 Gbps verbinding waar voice verkeer extra delay op zou lopen zodra er meer dan 1.25 Gbps (ofwel 50%) aan voice verkeer op de verbinding komt, ook in de situatie dat er in totaal slechts 1.75 Gbps (dus nog niet maximaal

belast) aan data over de verbinding gaat. In de voor dit onderzoek uitgevoerde testen, kon het delay verhogende effect alleen worden waargenomen rond een maximaal capaciteitsgebruik (2 Mbps in totaal). Achteraf gezien zijn er meerdere oorzaken mogelijk voor het oplopen van de delay van het voice verkeer. Zo zijn de testen uitgevoerd met een priority queue van 1 Mbps, waardoor het teveel aan voice verkeer (in totaal 1.4 Mbps, dus 400 kbps teveel) geen absolute voorrang meer geniet. Van dit verkeer is dus niet te zeggen of de verhoogde delay het gevolg is van de te kleine priority queue of van het te hoge percentage voice verkeer op de verbinding. Ook waren er achteraf gezien meer meting benodigd om de delay bij verschillend capaciteitsgebruik (10%, 20%, 30% enz.) vast te stellen. Hierdoor was het misschien mogelijk geweest om nauwkeurig vast te stellen of er inderdaad geen toename van de delay was bij bijv. 60% capaciteitsgebruik. In Davie & Farrel (2008) wordt niet benoemd hoe groot de toename ongeveer zou moeten zijn, misschien lag de toename wel in de orde van 1 ms. Laatste mogelijke oorzaak is het verschil in gebruikte apparatuur. MPLS Traffic Engineering technieken zijn vooral bedoeld voor ISP netwerken, daarin worden voornamelijk verbindingen van 1 Gbps of meer gebruikt. Voor dit onderzoek waren helaas alleen metingen aan routers met een verbinding van enkele Mbps beschikbaar. Bij een 2 Mbps verbinding spelen vele delay verhogende factoren een rol die bij Gigabit verbindingen geen rol meer spelen. Zo is bijvoorbeeld de transmission delay (dat is de tijd die het kost om een pakketje op de verbinding te plaatsen) bij een 2 Mbps ongeveer 1 à 2 ms, op een Gigabit verbinding ligt deze delay waarschijnlijk en factor 100 of 1000 lager. Dit soort effecten maken het lastiger om een zuivere delay verhoging van voice verkeer te meten. Helaas was er niet genoeg tijd om nader onderzoek naar deze punten te doen.

Testen netwerk Recovery en Protection

Het doel van de eerste test was om te bepalen hoe lang de beschikbare capaciteit niet gebruikt werd na uitval van de verbinding tussen R2 en R4 of de uitval van router R2 in de situatie zonder MPLS Traffic Engineering. De verwachting was dat de beschikbare capaciteit enkele seconden (ergens tussen 1 en 10 s) niet gebruikt zou worden. Testen wezen uit dat de beschikbare capaciteit ca. 7.5 seconden niet gebruikt wordt, zowel bij uitval van de verbinding tussen R2 en R4 als bij uitval van de router R2. Hoewel dit binnen de marge van de verwachting ligt, is de tijd toch aan de hoge kant. In Osborne & Simha (2002, p.292) wordt aangegeven dat het in grote netwerken zo'n 5 à 10 seconden kan duren voordat OSPF geconvergeerd is. Het testnetwerk van vier routers kan toch moeilijk als groot netwerk omschreven worden in vergelijking met een ISP netwerk. Vermoedelijk wordt dit enerzijds veroorzaakt doordat router R1 zeer druk is, deze krijgt 200 pakketjes per seconde toegezonden van de Pagent router. ISP routers beschikken waarschijnlijk over betere processoren om het SPF algoritme te berekenen. En anderzijds door de OSPF hello timers die standaard gebruikt worden. Terugkijkend in de testresultaten blijkt het ca. drie seconde te duren voordat R1 'neighbor' R2 'dood' verklaart. OSPF verzendt standaard elke seconde een 'hello packet' naar alle buren (neighbors) om te kijken of de neighbor nog bereikbaar is. Na drie gemiste hello packets wordt de neighbor dood verklaard en het SPF algoritme opnieuw gestart. Deze twee aspecten zouden de oorzaak kunnen zijn van de 7.5 seconden uitval. Extra testen met een lagere hello timer zouden waarschijnlijk voor een kortere uitval dan 7.5 seconden zorgen.

De tweede test was bedoeld om aan te tonen hoe lang de beschikbare capaciteit niet gebruikt werd na uitval van de verbinding tussen R2 en R4 of de uitval van router R2 in de situatie met MPLS Traffic Engineering. De verwachting was dat de beschikbare capaciteit ca. 50 ms niet gebruikt zou worden. Testen wezen uit dat de capaciteit 170 tot 200 ms niet gebruikt werd zowel bij uitval van de verbinding tussen R2 en R4 als bij uitval van de router R2. Dat is een factor 3 à 4 hoger dan verwacht. De reden hiervoor is vergelijkbaar met de reden bij test 1. Osborne & Simha (2002, p.309) geven aan dat het er bij Fast Reroute allemaal om draait zo snel mogelijk te detecteren dat een verbinding of router uitgevallen is. Interfaces van glasvezelverbindingen (MPLS Traffic Engineering technieken zijn natuurlijk vooral bedoeld voor ISP netwerken die veel gebruik maken van glasvezelverbindingen) hebben een speciaal hiervoor ontwikkelt mechanisme om uitval binnen 50 ms te detecteren. In Osborne & Simha wordt op dezelfde pagina aangegeven dat routers die niet over dit mechanisme beschikken, gebruik kunnen maken van de 'RSVP hello packets'. Dit berust op hetzelfde principe als de OSPF hello packet (zie beschrijving test 1). Voor deze test is gebruik gemaakt van RSVP hello packets die elke 50 ms verzonden worden. Omdat de verbinding, zoals achteraf bleek, pas na vier gemiste hello packet 'dood' wordt verklaard, duurt het dus 150 tot 200 ms voordat de uitval gedetecteerd wordt. Dat klopt precies met de gevonden 170 tot 200 ms. Jammer genoeg was er geen tijd meer om de testen te herhalen met een hello packets die elke 10 ms verstuurd worden. Daarmee zou met zekerheid vastgesteld kunnen worden of dit inderdaad de oorzaak was van de langere uitval. Ondanks dat dit bewijs ontbreekt, heeft het netwerk in de situatie met MPLS Traffic Engineering in ieder geval veel minder tijd nodig dan het netwerk zonder MPLS Traffic Engineering om een nieuwe route te vinden na uitval van een router of verbinding.

De derde en laatste test was bedoeld om te bewijzen dat de Link en Node protection tunnel inderdaad gebruikt worden bij uitval van de verbinding tussen R2 en R4 of uitval van router R2. De verwachting was dat deze tunnels inderdaad gebruikt zouden worden. De status van de Link en Node Protection tunnel zou na het uitvallen direct (binnen 200ms op basis van test 2) moeten veranderen van ready in active. Ready betekent dat de tunnel standby is en klaar voor gebruik. Active betekent dat de tunnel ook daadwerkelijke als backup route gebruikt wordt. De testen hebben uitgewezen dat de status van zowel de Link als de Node Protection tunnel direct veranderen van ready naar active. Daarmee voldoet de test aan de verwachting.

Samenvattend hebben de testen uitgewezen dat MPLS Traffic Engineering technieken inderdaad voor een veel sneller herstel van de route zorgen. Waarmee het netwerk met MPLS Traffic Engineering conform de verwachting een veel effectievere benutting heeft dan het netwerk zonder MPLS Traffic Engineering. Op basis van deze testresultaten zou het netwerk met MPLS Traffic Engineering ca. 40 keer zo snel voor een omleiding zorgen, wat overeenkomt met het voorbeeld. Zoals bij test 1 en 2 reeds opgemerkt, zouden beide hersteltijden middels een verbeterde configuratie veel lager moeten uitvallen. De verwachting is dat de hersteltijd in de situatie met MPLS Traffic Engineering verkort kan worden tot 50 ms. In plaats van de gemeten gemiddelde hersteltijd van 187.5 ms zou dat een factor 3.75 sneller zijn. In de situatie zonder MPLS Traffic Engineering is de verwachting dat de hersteltijd verkort kan worden tot 1 à 2 seconden. Dat is een

factor 3.75 tot 7.5 sneller. Op basis van deze verwachte hersteltijden zou het netwerk met MPLS Traffic Engineering dus voor een 20 tot 40 keer sneller herstel moeten kunnen zorgen.

9.5 Conclusie Proof of Concept

De verschillende MPLS Traffic Engineering technieken zorgen in de praktijk inderdaad voor een effectievere benutting van een MPLS netwerk met standaard routering. Voor alle drie de toepassingsgebieden werd een duidelijk effectievere benutting gemeten bij het netwerk met MPLS Traffic Engineering dan bij het netwerk zonder MPLS Traffic Engineering. Daarmee is de belangrijkste deelvraag van het Proof of Concept gedeelte beantwoord (Zorgen deze technieken in de praktijk inderdaad voor een effectievere benutting van het netwerk?). De gevonden resultaten komen in grote lijnen overeen met de theoretische voorbeelden uit hoofdstuk 8. Er werden weliswaar afwijkingen gevonden, maar deze waren verklaarbaar. Er zijn tevens suggesties voor aanvullende testen gedaan om de afwijkingen weg te nemen. Voor deze aanvullende testen was in dit onderzoek helaas geen tijd meer.

De andere twee deelvragen die in dit hoofdstuk beantwoord zijn:

- Hoe zou het effectiever benutten van het netwerk door toepassing van deze technieken in de praktijk getest kunnen worden? Beantwoord in hoofdstuk 9.2: Door een netwerk te bouwen dat aan de in hoofdstuk 9.2 gestelde eisen voldoet, kan het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering in de praktijk getest worden.
- Welk netwerk is nodig voor zo'n praktijktest? Beantwoord in hoofdstuk 9.3, aangevuld met de configuraties in de externe bijlage Netwerkconfiguraties: De drie netwerk topologieën en de daarbij behorende configuraties vormen samen de netwerken die nodig zijn voor de praktijktesten.

10. Conclusie en aanbevelingen

Door het aanbrengen van MPLS Traffic Engineering Load sharing tunnels over verschillende routes van A naar B met een ongelijke cost kan een MPLS netwerk met standaard routering effectiever benut worden. Door het aanbrengen van de tunnels wordt het mogelijk om alle beschikbare capaciteit van A naar B te benutten, terwijl in het netwerk met standaard routering alleen de beschikbare capaciteit van de snelste route (de route die door het routing protocol is verkozen als beste/snelste route) wordt benut. Door de inzet van DiffServ Traffic Engineering tunnels kan een netwerk met standaard routering eveneens effectiever benut worden. Met behulp van DiffServ Traffic Engineering tunnels kan het percentage dataverkeer met een hoge prioriteit (bijv. voice verkeer) op elke verbinding in het netwerk beperkt gehouden worden. Hierdoor kan al het voice verkeer met een lage delay verstuurd worden en blijft de totale delay die het voice verkeer oploopt gegarandeerd laag. In een MPLS netwerk met standaard routering is het niet mogelijk om het percentage voice verkeer te beheersen. Daardoor kan niet gegarandeerd worden dat het voice verkeer op elke verbinding met een lage delay wordt verstuurd, waardoor ook geen lage totale delay gegarandeerd kan worden. De laatste manier waarop een MPLS netwerk met standaard routering effectiever benut kan worden is door de inzet van MPLS Traffic Engineering Recovery en Protection technieken. Daarbij wordt een normale MPLS Traffic Engineering tunnel beschermd door preventief aangebrachte backup tunnels. Deze backup tunnels kunnen het dataverkeer razendsnel (binnen ca. 50 ms) omleiden in het geval dat er een verbinding of een router op de route van de normale tunnel uitvalt. Hierdoor gaat er dus maximaal 50 ms aan data verloren. In een netwerk met standaard routering gaan alle routers na het uitvallen van een verbinding of router eerst informatie uitwisselen. Met deze informatie gaan de routers vervolgens op basis van de nieuwe situatie een nieuwe route naar alle bestemmingen in het netwerk berekenen. Afhankelijk van de grootte van het netwerk (aantal routers en aantal subnetwerken) kost dit 1 tot 10 seconden. Hierdoor gaat er dus 1 tot 10 seconden aan data verloren, wat beduidend meer is dan de 50 ms in de situatie met MPLS Traffic Engineering.

De hierboven beschreven effectieve benutting is in dit onderzoek zowel in theorie als in de praktijk bepaald. Voor een aantal theoretische voorbeeld netwerken is bepaald wat in theorie de totale effectieve benutting van dat netwerk met MPLS Traffic Engineering en zonder MPLS Traffic Engineering (is MPLS netwerk met standaard routering) technieken is. Van drie van deze voorbeeld netwerken is de effectieve benutting met en zonder MPLS Traffic Engineering gemeten. Uit de resultaten van deze praktijktesten is gebleken dat de verschillende MPLS Traffic Engineering technieken in de praktijk inderdaad voor een effectievere benutting van een MPLS netwerk met standaard routering zorgen. Voor alle drie de toepassingsgebieden (Load sharing, DiffServ Traffic Engineering en Recovery & Protecion) werd een duidelijk effectievere benutting van het netwerk met MPLS Traffic Engineering dan zonder MPLS Traffic Engineering gemeten. De gemeten effectieve benuttingen komen in grote lijnen overeen met de theoretische voorbeelden. Er werden weliswaar afwijkingen gevonden, maar deze waren verklaarbaar. Bij de aanbevelingen worden suggesties gedaan voor aanvullende testen waarmee deze afwijkingen weggenomen kunnen worden. Voor deze aanvullende testen was in dit onderzoek helaas geen tijd meer.

Tijdens dit onderzoek zijn onderstaande deelvragen beantwoord, achter de deelvraag is aangegeven in welk hoofdstuk de antwoorden te vinden zijn:

1. Wat is een MPLS netwerk? Beantwoord in hoofdstuk 2.
2. Wat is Traffic Engineering? Beantwoord in hoofdstuk 3.
3. Welke MPLS Traffic Engineering technieken zijn er? Beantwoord in hoofdstuk 4.
4. Welke mogelijkheden bieden de MPLS Traffic Engineering technieken? Beantwoord in hoofdstuk 6.
5. Welke criteria bepalen de effectiviteit van de benutting van een (MPLS) netwerk? Beantwoord in hoofdstuk 7.
6. Hoe effectief wordt een MPLS netwerk zonder Traffic Engineering technieken benut? Beantwoord in hoofdstuk 8.
7. Hoe zouden de gevonden Traffic Engineering technieken bij kunnen dragen aan het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering? Beantwoord in hoofdstuk 8.
8. Hoe zou het effectiever benutten van het netwerk door toepassing van deze technieken in de praktijk getest kunnen worden? Beantwoord in hoofdstuk 9.2.
9. Welk netwerk is nodig voor zo'n praktijktest? Beantwoord in hoofdstuk 9.3 en in externe bijlage Netwerkconfiguraties.
10. Zorgen deze technieken in de praktijk inderdaad voor een effectievere benutting van het netwerk? Beantwoord in hoofdstuk 9.5.

Aanbevelingen

Zoals in de conclusie al aangegeven komen de praktijktesten in grote lijnen overeen met de theorie, maar zijn er nog wel een aantal afwijkingen tussen de theorie en de praktijk. Hierna wordt per toepassingsgebied aangegeven welke aanvullende testen uitgevoerd zouden kunnen worden om de afwijkingen weg te nemen.

Load sharing

In de praktijktesten werd een kleine afwijking (ca. 2%) in de effectieve benutting in de situatie met MPLS Traffic Engineering gevonden ten opzichte van de theorie. De afwijking is verklaard door het feit dat de data niet gelijk wordt verdeeld over beide tunnels. De vraag blijft hoe het komt dat de data niet precies gelijk worden verdeeld over beide routes. Dit heeft waarschijnlijk te maken met de precieze manier waarop het load sharing (verdelen van data over de tunnels) plaatsvindt. Mogelijk zou dit voorkomen kunnen worden door de Pagent router twee afzonderlijke datastromen (flows) te laten genereren. Meer informatie over deze aanvullende test is te vinden in hoofdstuk 9.4, kopje 'Testen netwerk met Unequal cost load sharing' bij de beschrijving van de tweede test.

DiffServ Traffic Engineering

In de praktijktesten werd conform de verwachting in het netwerk zonder MPLS Traffic Engineering een hogere delay gemeten dan in het netwerk met MPLS Traffic Engineering. Uit de praktijktesten was echter niet te bepalen of de oorzaak van deze delay gelijk is aan de oorzaak die in de theorie genoemd wordt. Voor het achterhalen van de oorzaak zijn aanvullende testen nodig. Meer

informatie over die aanvullende testen is te vinden in hoofdstuk 9.4, kopje 'Testen netwerk DiffServ Traffic Engineering', in de laatste alinea.

Recovery en Protection

Bij de praktijktesten werd aangetoond dat de hersteltijd na het uitvallen van een verbinding of router in het netwerk zonder MPLS Traffic Engineering ongeveer 40 maal zo hoog was als in het netwerk met MPLS Traffic Engineering. De hersteltijd lag in beide situaties echter grofweg een factor 4 hoger dan verwacht. Bij de beschrijving van de eerste en tweede test in hoofdstuk 9.4, kopje 'Testen netwerk Recovery en Protection' is aangegeven welke aanvullende testen kunnen worden uitgevoerd om de hersteltijd te verkorten naar de verwachte hersteltijd.

11. Literatuur

1) Osborne, E., Simha, A., *Traffic Engineering with MPLS*, (2002, eerste druk), Indianapolis USA: Cisco Press;
2) Davie, B., Farrel, A., *MPLS: Next Steps*, (2008, eerste druk), Burlington USA: Morgan Kaufmann Publishers (Elsevier);
3) Minei, I., Lucek, J., *MPLS-Enabled Applications*, (2005, eerste druk), Chichester England: John Wiley & Sons Ltd;

BIJLAGE 1

Lijst van gebruikte afkortingen

Afkortingen

ATM	Asynchronous Transfer Mode
bps	bits per seconde
CBWFQ	Class Based Weighted Fair Queuing
CEF	Cisco Express Forwarding
CER	Customer Edge Router
CSPF	Constrained Shortest Path First
DiffServ	Differentiated Services
DSCP	Differentiated Services Code Point
DS-TE	DiffServ Traffic Engineering
EIGRP	Enhanced Iterior Gateway Routing Protocol
FIB	Forwarding Information Base
FRR	Fast Reroute
Gbps	Gigabits per seconde
HHS	Haagse Hogeschool
IOS	Internetwork Operation System
ip	internet protocol
IS-IS	Intermediate System to Intermediate System
ISP	Internet Service Provider
kbps	kilobits per seconde
LDP	Label Distribution Protocol
LER	Label Edge Router
LFIB	Label Forwarding Information Base
LIB	Label Information Base
LLQ	Low Latency Queuing
LSR	Label Switch Router
MAM	Maximum Allocation Model
Mbps	Megabits per seconde
MPLS	Multi Protocol Label Switching
ms	milli seconde
OSI	Open Systems Interconnection
OSPF	Open Shortest Path First
PPP	Point to Point Protocol
QoS	Quality of Service
RDM	Russian Dolls Model
RIP	Routing Information Protocol
RSVP	Resource Reservation Protocol
SLA	Service Level Agreement
SPF	Shortest Path First
TDP	Tag Distribution Protocol
TE	Traffic Engineering
WRED	Weighted Random Early Detection

Selectie literatuur voor onderzoek: Hoe kunnen Traffic Engineering technieken worden ingezet voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?

Versie: 1.0 Definitief

Auteur:Sebastiaan van de Grint (studentnummer 4401)

Opdrachtgever: Richard Schmidt
Blok: TI-dt G3 Afstuderen

Den Haag, 29 maart 2010

Inhoudsopgave Pagina

1. Selectie literatuur

Eerst wordt de selectie van de voor dit onderzoek gebruikte boeken behandeld, daarna de selectie van artikelen.

1.1 Selectie boeken

zoekstrategie uit onderzoeksplan

Voor het zoeken naar de ontbrekende literatuur zullen de in hoofdstuk 5.5.3 genoemde bronnen geraadpleegd worden. Zoals aangegeven wordt in eerste instantie naar boeken gezocht. 'MPLS' en/of 'Traffic Engineering' zijn de eerste zoektermen. Afhankelijk van het aantal zoekresultaten zal verfijning plaats moeten vinden.
Verfijning kan voor dit onderzoek door:

- alleen te zoeken naar boeken met een recentere publicatie datum dan die van de beschikbare literatuur;
- namen van gevonden technieken uit de beschikbare literatuur als extra zoekterm(en) toe te voegen;
- zoeken naar boeken met bijvoorbeeld MPLS en Traffic Engineering in de titel.

Zodra een maximum aantal zoekresultaten van ca. 30 is bereikt, kan de daadwerkelijke selectie beginnen. Selectie zal gebeuren door onderstaande stappen te doorlopen:

1. Titel bekijken: alleen als uit de titel blijkt dat het boek duidelijk niet geschikt is voor dit onderzoek valt het boek af, bij enige twijfel door naar stap 2.
2. Inhoudsopgave bekijken: op basis van aantal pagina's of gedeelte van het boek dat over Trafffic Engineering in MPLS netwerken gaat wordt de volgende keuze gemaakt. Veel pagina's betekent door naar stap 3, weinig pagina's betekent boek valt af, bij twijfel boek op reservelijst.
3. Beschikbaarheid boek: voorkeur gaat uit naar boeken die beschikbaar zijn in de TU-Delft bibliotheek of via books.google.com. Niet al te dure boeken of zeer interessante boeken kunnen eventueel worden aangeschaft via www.amazon.com of een andere (online) boekwinkel.

Hoe minder zoekresultaten er zijn, hoe soepeler de genoemde selectiecriteria zullen worden toegepast.

Verklaring tabelkoppen

De tabelkoppen van tabel 2, 4, 6 en 7 zijn nogal beknopt om de tabelinhoud leesbaar te houden. Een korte toelichting op de tabelkoppen staat hieronder.

tabelkop	**verklaring**
Titel	Titel van het boek
Titel interessant?	Slaat op selectiestap 1, zoals hiervoor beschreven.
Pub. jaar	Publicatie jaar
Aant. pagina's MPLS-TE/totaal	Aantal pagina's over MPLS-Traffic Engineering / totaal aantal pagina's. Slaat op selectiestap 2, zoals hiervoor beschreven.
Interessant aant. pag.?	Beoordeling of het boek op basis van het aantal pagina's over MPLS-TE interessant is. Meer dan 100 is 'ja', 50-100 is 'twijfel', minder dan 50 is 'nee'. Slaat op selectiestap 2, zoals hiervoor beschreven.
Toelichting	Verduidelijking, of verklaring van afwijking van de zoekstrategie.

TU-Delft

De zoekinstellingen die voor alle zoekacties gebruikt zijn:

- TU-Delft online catalogus: http://aleph.library.tudelft.nl
- datum zoekactie: 19 november 2009
- gezocht documenttype: alle
- standaard zoekinstelling: Field to search = basic index, Words adjacent = no

Tabel 1. Resultaten zoekacties TU-Delft

Nr.	Zoektermen	Verfijning op:	Hits [-]	Heeft er selectie plaatsgevonden?
1	MPLS	-	25	Nee, MPLS is als losse zoekterm iets te ruim, vooral bedoeld als oriënterend zoeken, eerst even kijken hoeveel hits er met Traffic Engineering overblijven, als dat er 0 zijn kan ik altijd nog uit deze 25 resultaten selecteren.
2	Traffic + Engineering	-	304	Nee, te veel hits
3	Traffic + Engineering + MPLS	-	9	Ja

Tabel 2. Selectieprocedure boeken van zoekactie 3 bij de TU-Delft

Titel	Titel interessant?	Pub. jaar	Aant. pagina's MPLS-TE/totaal	Interessant aant. pag.?	Toelichting
Delivering carrier Ethernet	Nee	-	-	-	
OSPF and IS-IS	Nee	-	-	-	
MPLS: next steps	**Ja**	2008	150/414	**Ja**	
Network quality of service: know it all	**Ja**	2008	35/330	Nee	
Service automation and dynamic provisioning techniques in IP/MPLS environments	**Ja**	2008	<10/332	Nee	
MPLS-enabled applications	**Ja**	2005	130/406	**Ja**	
The Internet and its protocols	**Ja**	2004	20/809	Nee	
MPLS and label switching networks	**Ja**	2001	30/236	Nee	
MPLS	**Ja**	2000	20/286	Nee	

Amazon

De zoekinstellingen die voor alle zoekacties gebruikt zijn:

- website: www.amazon.com
- datum zoekactie: 23 november 2009
- gezocht documenttype: books

De zoektermen bij zoekactie 6 en 7 komen uit de inhoudsopgave van "Traffic Engineering with MPLS". Beide termen zijn specifieke Traffic Engineering technieken.

Tabel 3. Resultaten zoekacties boeken bij Amazon

Nr.	Zoektermen	Verfijning op:	Hits [-]	Heeft er selectie plaatsgevonden?
1	MPLS	geen	14594	Nee, te veel hits
2	MPLS	• categorie: Computers & Internet › Networking › Networks, Protocols & APIs	1474	Nee, te veel hits
3	MPLS + Traffic + Engineering	• categorie: Computers & Internet › Networking › Networks, Protocols & APIs	267	Nee, te veel hits
4	MPLS + Traffic + Engineering	• jaartal: vanaf jan 2005 • categorie: Computers & Internet › Networking › Networks, Protocols & APIs	125	Nee, te veel hits
5	MPLS + Traffic + Engineering	• jaartal: vanaf jan 2005 • categorie: Computers & Internet › Networking › Networks, Protocols & APIs › Networks	90	Nee, te veel hits
6	MPLS + Traffic + Engineering + tunnel	• categorie: Computers & Internet › Networking › Networks, Protocols & APIs	17	Nee, zoekresultaten lijken erg onrelevant. Dit wordt geconcludeerd uit de titels en uit het afwezig zijn van wel relevante titels. Bij vorige zoekacties verschenen in het eerste resultatenscherm (12 zoekresultaten) allemaal boeken die op basis van de titel interessant zijn. Een voorbeeld is het boek dat reeds in het bezit van de afstudeerder is. De afwezigheid van deze titel duidt erop dat de aanwezigheid van zoektermen in de inhoudsopgave niet voldoende is. Het lijkt erop dat de zoektermen echt als keywords aan het boek toegevoegd moeten zijn, wil het boek bij de resultaten verschijnen.
7	MPLS + Traffic + Engineering + reroute	• categorie: Computers & Internet › Networking › Networks, Protocols & APIs	6	Nee, zelfde reden als hierboven

Nr.	Zoektermen	Verfijning op:	Hits [-]	Heeft er selectie plaatsgevonden?
8	MPLS + Traffic + Engineering	• jaartal: vanaf jan 2005 • categorie: Computers & Internet › Networking	90	Ja, zoeken op MPLS en Traffic Engineering levert te veel hits op (minimaal 90), toevoeging van een extra zoekterm als 'tunnel' of 'reroute' levert te weinig relevante hits op. De opgestelde zoekstrategie loopt hier dus enigszins vast. Extra verfijning is lastig, verfijnen op categorie lukt niet, verfijnen op jaartal is niet logisch. Voor literatuur uit de laatste 5 jaar (vanaf 2005) valt wel wat te zeggen (conform toelichting zoekstrategie onderzoeksplan), maar verfijning door te zoeken in literatuur vanaf bijv. 2008 is moeilijk verdedigbaar. Conform het onderzoeksplan wordt een goed boek gezocht waarin diep op het toepassen van Trafffic Engineering technieken wordt ingegaan. Bij voorkeur dient dit boek recenter dan 2002 (reeds beschikbare boek) te zijn. Dit lijkt redelijk aangezien in ca. 7 jaar tijd de kans redelijk groot is dat er een goed boek over dit onderwerp uitkomt. Ook in 5 jaar (zoeken vanaf 2005) is dit argument redelijk. De kans dat in een periode van 2 jaar een goed boek uitkomt is echter al weer veel kleiner en dus moeilijker verdedigbaar. Omdat uit het eerste scherm met resultaten van zoekpoging 5 blijkt dat er bij zoeken op MPLS en Traffic Engineering veel interessante titels bij zitten, wordt besloten nog eens nader naar de zoekstrategie te kijken. Hieruit blijkt dat met name stap 2 (bekijken inhoudsopgave) en stap 3 (bekijken beschikbaarheid) redelijk veel tijd kosten. Stap 1 (screenen Titel) is wel snel te doen. Het argument dat bij de zoekstrategie genoemd werd om bij maximaal 30 zoekresultaten over te gaan tot selectie, was ook dat het bekijken van maximaal 30 inhoudsopgaven nog wel binnen redelijke tijd te doen is. Besloten wordt om de 90 zoekresultaten van zoekpoging 5 te screenen op titel. Wanneer er na stap 1 maximaal ca. 30 titels overblijven, zal hiervan de inhoudopgave bekeken worden.
9	MPLS + Traffic + Engineering	• categorie: Computers & Internet › Networking	267	Ja, zie toelichting zoekactie 8 + aanvulling: Bij de selectie van zoekactie 8 werden 8 interessante titels gevonden. Opvallend is dat bij resultaat 24 tot 90 geen enkele interessante titels zit. Dit wijst erop dat de 'relevantie' (boeken worden standaard gesorteerd op relevantie) van Amazon op z'n minst redelijk werkt. Omdat bij deze zoekactie de verfijning 'vanaf 2005' als publicatiejaar nog aanstond en er slechts 8 resultaten overblijven, is besloten om ook nog wat ruimer te zoeken. Bijkomende reden om ruimer te zoeken is dat de interessante titels die bij de TU Delft gevonden werden niet tussen de zoekresultaten stonden. Eerder bij zoekactie 3 kwamen deze titels nog op het eerste resultatenscherm. Daarom zal zoekactie 3 herhaald worden, waarbij de eerste 100 titels zullen worden gescreend. Dit laatste lijkt op basis van de eerder bevindingen ten aanzien van de relevantie met deze zoektermen gerechtvaardigd

De titels die niet interessant bevonden werden bij zoekactie 8 en 9 zijn niet opgenomen in tabel 4, daarvoor zijn het er te veel. Het waren vooral heel veel boeken over internationale congressen op computertechnologiegebied. Daarnaast waren er een groot aantal boeken waarvan niet verwacht wordt dat een groot deel van de inhoud op MPLS Traffic Engineering gericht zal zijn. Enkele voorbeelden van niet geselecteerde titels: Junos for Dummies, Cisco Express Forwarding, Cisco Telepressence Fundamentals, Advanced Wireless Networks: Cognitive, Cooperative & Opportunistic 4G Technology.

Tabel 4. Selectieprocedure boeken van zoekactie 8 en 9 bij Amazon

Titel	**Titel interessant?**	**Pub. jaar**	**Aant. pagina's MPLS-TE/totaal**	**Interessant aant. pag.?**	**Toelichting**
GMPLS: Architecture and Applications	**Ja**	2006	100/395	Twijfel	100 pagina's echt over TE, ook veel achtergrondinformatie over bijv. routeselectie, hoofdonderwerp boek is GMPLS, de laag 1 variant van MPLS
Interconnecting Data Centers Using VPLS	**Ja**	2009	10/339	Nee	
Traffic Engineering and QoS Optimization of Integrated Voice & Data Networks	**Ja**	2007	200+/455	**Ja**	Erg praktijkgericht, te zien aan groot deel over capacity management en vele case-studies
MPLS Fundatmentals	**Ja**	2006	80/608	Twijfel	Hoewel niet superveel pagina's over TE, wel veel over de MPLS basis, daarom toch redelijk interessant
MPLS and Next-Generation Networks: Foundations for NGN and Enterprise Virtualization	**Ja**	2006	30/383	Nee	
Network Congestion Control: Managing Internet Traffic	**Ja**	2005	15/259	Nee	
The Competitive Internet Service Provider: Network Architecture, Interconnection, Traffic Engineering and Network Design	**Ja**	2006	35/365	Nee	
Connection-Oriented Networks: SONET/SDH, ATM, MPLS and Optical Networks	**Ja**	2005	20/323	Nee	
Traffic Engineering in MPLS Networks	**Ja**	2006	?/304	**Ja**	Op dit moment niet beschikbaar, inhoudsopgave is niet in te zien, titel lijkt desondanks zeer interessant.
Traffic Engineering Using Multipath Routing Approaches: Multipath Routing in MPLS and WSNs	**Ja**	2008	?/112	Twijfel	Inhoudsopgave is niet in te zien, korte beschrijving geeft aan dat het over MPLS en Wireless Sensor Netwerken gaat.
MPLS for Metropolitan Area Networks	**Ja**	2004	200/405	**Ja**	
Network Recovery: Protection and Restoration of Optical, SONET-SDH, IP, and MPLS	**Ja**	2004	120/497	Twijfel	Een hoofdstuk over MPLS TE en dan met name het recovery (Fast Reroute) onderdeel van MPLS TE
Rick Gallaher's MPLS Training Guide: Building Multi Protocol Label Switching Networks	**Ja**	2003	50/291	Twijfel	100 pagina's echt over TE, ook veel achtergrondinformatie over bijv. routeselectie, hoofdonderwerp boek is GMPLS, de laag 1 variant van MPLS
CCIP: MPLS Study Guide	**Ja**	2002	<10/457	Nee	
MPLS: Technology and Applications	**Ja**	2000	<10/267	Nee	Erg praktijkgericht, te zien aan groot deel over capacity management en vele case-studies
MPLS Network Management: MIBs, Tools, and Techniques	**Ja**	2003	110/505	**Ja**	Hoewel niet superveel pagina's over TE, wel veel over de MPLS basis, daarom toch redelijk interessant
Data Network Engineering	**Ja**	1999	<10/346	Nee	

Google boeken

De zoekinstellingen die voor alle zoekacties gebruikt zijn:

- website: books.google.com
- datum zoekactie: 25 november 2009, behalve zoekactie 7 die was op 10 december
- gezocht documenttype: boeken

De zoektermen bij zoekactie 4 t/m 6 komen uit de inhoudsopgave van "Traffic Engineering with MPLS". De zoekterm 'link protection' werd gevonden tijdens het bestuderen van de tekst van het genoemde boek. Deze term is een andere benaming van de techniek 'fast reroute'. Om te voorkomen dat hierdoor interessante boeken over het hoofd gezien zijn, is ook nog gezocht op deze term. Alle termen zijn namen van Traffic Engineering technieken.

Tabel 5. Resultaten zoekacties boeken bij Google

Nr.	Zoektermen	Verfijning op:	Hits [-]	Heeft er selectie plaatsgevonden?
1	MPLS + Traffic + Engineering		839	Nee, te veel hits
2	MPLS + Traffic + Engineering	• jaartal: vanaf jan 2005	423	Nee, te veel hits
3	MPLS + Traffic + Engineering	• jaartal: vanaf jan 2005 • Beperkte weergave en volledige weergave	351	Nee, te veel hits
4	MPLS + Traffic + Engineering + tunnel	• jaartal: vanaf jan 2005	442	Nee, te veel hits
5	MPLS + Traffic + Engineering + tunnel	• jaartal: vanaf jan 2005 • Beperkte weergave en volledige weergave	256	Nee, te veel hits
6	MPLS + Traffic + Engineering + tunnel + "fast reroute"	• Beperkte weergave en volledige weergave	53	Ja, zie toelichting bij zoekactie 8 in Tabel 4.
7	MPLS + Traffic + Engineering + tunnel + "link protection"	• Beperkte weergave en volledige weergave	23	Ja

De titels die niet interessant bevonden werden bij zoekactie 6 zijn niet opgenomen in tabel 6, daarvoor zijn het er te veel. Het waren vooral heel veel boeken over internationale congressen op computertechnologiegebied. De titels waarvan bij www.amazon.com de inhoudsopgave reeds is bekeken, zijn niet nogmaals beoordeeld. Daarnaast waren er een groot aantal boeken waarvan niet verwacht wordt dat een groot deel van de inhoud op MPLS Traffic Engineering gericht zal zijn. Enkele voorbeelden van niet geselecteerde titels: Broadband Internet deployment in Japan, Optical networks and technologies, JUNOS cookbook, Achieving the triple play: technologies and business models for success.

Tabel 6. Selectieprocedure boeken van zoekactie 6 en 7 bij Google

Titel	Titel interessant?	Pub. jaar	Aant. pagina's MPLS-TE/totaal	Interessant aant. pag.?	Toelichting
Metro ethernet	**Ja**	2003	30/222	Nee	
QoS for IP/MPLS networks	**Ja**	2006	80/299	Twijfel	
Building MPLS-based broadband access VPNs	**Ja**	2005	<10/370	Nee	
Designing and Implementing IP/MPLS-Based Ethernet Layer 2 VPN Services	**Ja**	2009	200/984	**Ja**	

Picarta

Bij Picarta heeft slechts één interessante zoekactie plaatsgevonden. Onderstaande zoekactie maar dan met zoektermen 'MPLS + Traffic + Engineering' leverde 0 hits op. Onderstaande zoekactie maar dan met zoektermen 'Traffic + Engineering' leverde vele hits op, maar allemaal over wegverkeer. Het plannen van wegverkeersstromen heet ook 'Traffic Engineering'.

De zoekinstellingen voor de enige relevante zoekactie waren:

- website: Picarta, ingelogd via HHS portal: http://picarta.pica.nl.ezproxy.hhs.nl:2048/LNG=NE/DB=2.41/
- datum zoekactie: 25 november 2009
- gezocht documenttype: boeken
- zoekterm: MPLS

Uit de zoekactie kwamen 13 hits. De titels waarvan bij www.amazon.com of books.google.com de inhoudsopgave reeds is bekeken, zijn niet nogmaals beoordeeld.

Tabel 7. Selectieprocedure boeken van zoekactie 1 bij Picarta

Titel	**Titel interessant?**	**Pub. jaar**	**Aant. pagina's MPLS-TE/totaal**	**Interessant aant. pag.?**	**Toelichting**
Mesh-based survivable networks : options and strategies for optical, MPLS, SONET, and ATM networking	Nee				
MPLS : implementing the technology (inhoudsopgave niet beschikbaar)	**Ja**	2001	Zie toelichting	Nee	Via books.google.com gezocht op "traffic engineering" in dit boek, slechts 3 hits gevonden, daarmee conclusie getrokken dat slechts een zeer beperkt deel over traffic engineering gaat.
MPLS and VPN architectures (inhoudsopgave bekeken via books.google.com)	**Ja**	2001	<10/420	Nee	
MPLS: technology and applications (inhoudsopgave bekeken via books.google.com)	**Ja**	2000	Zie toelichting	Nee	Via books.google.com gezocht op "traffic engineering" in dit boek, slechts 3 hits gevonden, daarmee conclusie getrokken dat slechts een zeer beperkt deel over traffic engineering gaat.
Fault-Tolerant IP and MPLS Networks (inhoudsopgave bekeken op www.ciscopress.com)	**Ja**	2005	30/336	Nee	Slechts 1 van de 10 hoofdstukken ging over MPLS TE
MPLS and Label Switching Networks (2nd Edition, inhoudsopgave bekeken op www.amazon.com)	**Ja**	2002	30/336	Nee	

Beschikbaarheid boeken

Nu alle beoogde bronnen geraadpleegd zijn rest nog de laatste stap van het selectieproces, namelijk het daadwerkelijk selecteren van de boeken. Er zijn in totaal 7 boeken die als interessant genoeg betiteld zijn op basis van de inhoudsopgave. Een zeer opvallend resultaat was het boek 'Traffic Engineering in MPLS Networks'. Dit boek lijkt op basis van de titel volledig over MPLS Traffic Engineering te gaan. Op Amazon wordt het als 'op dit moment niet beschikbaar' aangegeven, maar het boek lijkt nooit te zijn uitgegeven. Er zijn geen gebruikte exemplaren te koop op Amazon en ook geen recensies over het boek. Zoeken op de website van de uitgever en de auteur levert evenmin iets op. Ook googlen levert geen aanvullende informatie op, behalve één website waar staat dat het boek nooit gepubliceerd is. Dat laatste lijkt dan ook de enige verklaring. In de zoekstrategie is aangegeven dat de voorkeur uitgaat naar boeken die bij de bibliotheek van de TU-Delft beschikbaar zijn, of die volledig op books.google.com staan. Van de 7 interessante boeken zijn er 2 via de TU-Delft beschikbaar. Deze boeken voldoen aan de selectiecriteria dat ze van een onafhankelijke uitgever zijn en dat ze recenter zijn uitgegeven dan het reeds beschikbare boek. Geen van de 7 boeken is volledig op books.google.com beschikbaar. Daarom is besloten om de 2 boeken van de TU-Delft te selecteren en verder te gebruiken voor dit onderzoek. Enige reden om hiervan af te wijken, had een groot verschil in het aantal interessante pagina's kunnen zijn. De 2 boeken van de TU-Delft bevatten respectievelijk ca. 130 en 150 over MPLS Traffic Engineering. De andere boeken bevatten 100 tot 200 pagina's over MPLS Traffic Engineering. Dat verschil is niet groot genoeg om af te wijken van de zoekstrategie. Mochten de 2 TU-Delft boeken in de praktijk tegenvallen, kan altijd nog besloten worden één van de andere boeken te gebruiken.

Op basis van het voorgaande is besloten om het reeds beschikbare boek (nummer 1 hieronder) te gebruiken als basis voor dit onderzoek. Dit boek van ruim 500 pagina's gaat geheel over MPLS Traffic Engineering. De theorie in dit boek zal vergeleken worden met de andere 2 boeken. Gecontroleerd zal worden of alle boeken dezelfde technieken benoemen en de werking en toepassing van de technieken overeenkomstig beschrijven. Indien dit het geval is, is het waarschijnlijk dat de informatie compleet is (behoudens recente ontwikkelingen, zie uitleg bij artikelen). En dat er binnen de netwerkwereld een eenduidige visie bestaat over de werking en toepassing van Traffic Engineering technieken. Wanneer de theorie overeenkomt, zal het niet nodig zijn om nog andere boeken te gebruiken.

De lijst met te gebruiken boeken:

1) Osborne, E., Simha, A., *Traffic Engineering with MPLS*, (2002, eerste druk), Indianapolis USA: Cisco Press;
2) Davie, B., Farrel, A., *MPLS: Next Steps*, (2008, eerste druk), Burlington USA: Morgan Kaufmann Publishers (Elsevier);
3) Minei, I., Lucek, J., *MPLS-Enabled Applications*, (2005, eerste druk), Chichester England: John Wiley & Sons Ltd;

1.2 Artikelen

zoekstrategie in onderzoeksplan

Hoewel de voorkeur uitgaat naar boeken is er één belangrijke reden om toch naar artikelen te zoeken. Die reden is dat nieuwe ontwikkelingen over het algemeen sneller in artikelen worden besproken dan in boeken. Informatie in een boek is over het algemeen minimaal een jaar oud, vanwege de tijd die het kost om een boek uit te geven. Informatie in artikelen is op het moment van publicatie meestal slechts één tot ca. 6 maanden oud. Er zal dus wel gezocht worden naar artikelen die recenter zijn dan het recentste gevonden boek. Daarnaast bestaat er ook nog de mogelijkheid dat er over een bepaalde techniek onvoldoende informatie in boekvorm te vinden is. In dat geval zal geprobeerd worden om één of meerdere artikelen te vinden om de informatie te verifiëren

TU-Delft

Bij het zoeken naar boeken is reeds gezocht op alle documenttypen. Tussen de resultaten waren geen artikelen. Er is niet opnieuw naar artikelen gezocht.

Amazon en Google

Op 10 december 2009 is op www.amazon.com en books.google.com gezocht op zoekterm 'MPLS + Traffic + Engineering' en documenttype 'tijdschriften' vanaf januari 2007. Er werden geen zoekresultaten gevonden. De verfijning op jaartal is op basis van het meest recent gepubliceerde boek dat gebruikt wordt voor dit onderzoek. Dat boek is uit 2008, informatie in een boek is mogelijk bij publicatie al een jaar oud. Daarom is gezocht naar artikelen vanaf januari 2007, wat een jaar eerder is dan de publicatiedatum van het boek.

Picarta

De zoekinstellingen die voor alle zoekacties gebruikt zijn:

- website: Picarta, ingelogd via HHS portal: http://picarta.pica.nl.ezproxy.hhs.nl:2048/LNG=NE/DB=2.41/
- Datum zoekactie: 10 december 2009
- verfijning op jaartal: vanaf januari 2007 (zie toelichting onder kopje Amazon en Google)
- online bronnen, tijdschriften (online), tijdschriften (gedrukt), artikelen. (niet geselecteerd: boeken, brieven, illustratief, geluid, software, bladmuziek, audiovisueel, cartografie)

Tabel 8. Resultaten zoekacties tijdschriften bij Picarta

Nr.	Zoektermen	Verfijning op:	Hits [-]	Heeft er selectie plaatsgevonden?
1	MPLS		105	Nee, te veel hits
2	Traffic + Engineering		410	Nee, te veel hits
3	MPLS + Traffic + Engineering		11	Ja

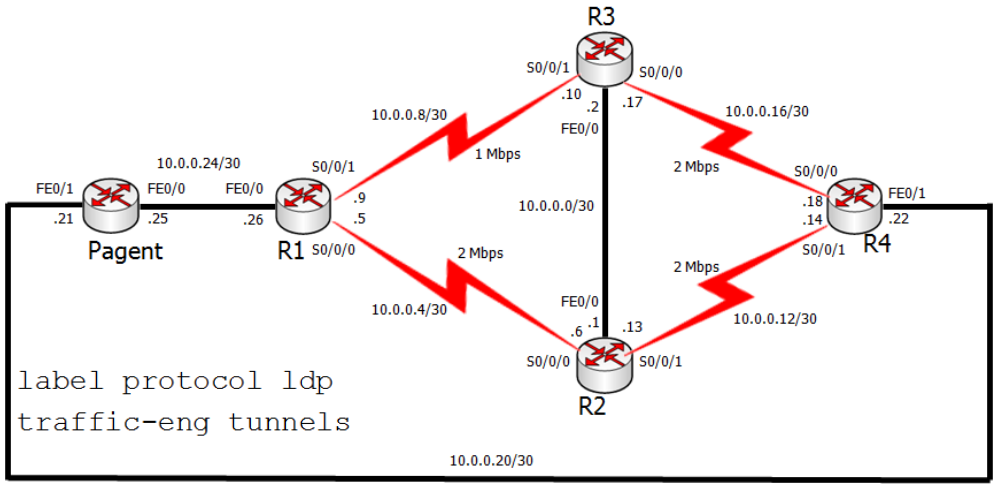
Tabel 9. Selectieprocedure tijdschriften van zoekactie 3 bij Picarta

Titel	**Preview mogelijk?**	**Pub. jaar**	**Interessant?**	**Toelichting**
Multilayer traffic engineering for multiservice environments	Ja	2009	Nee	Uiteindelijk geen van de 11 artikelen interessant genoeg bevonden. Van alle artikelen waarvan dat mogelijk was (de eerste 5) is de preview bekeken. Voor al deze artikelen geldt dat ze over nieuwe methoden of technieken gaan om het netwerkverkeer te optimaliseren. Dit zijn echter geen methoden die nu geconfigureerd kunnen worden. Het zijn meer voorstellen of ideeën waaruit in de toekomst een nieuwe standaard voort kan komen. De artikelen vallen daarmee buiten het doel van dit onderzoek, dat alleen ingaat op technieken die op dit moment in de praktijk getest kunnen worden. De artikelen waren hoogstens leuk geweest voor een kleine blik op de toekomst, maar voor alle artikelen dient betaald te worden. Ook voor de artikelen zonder preview dient betaald te worden. De titels zonder preview liggen in de lijn van de titels met preview. De verwachting is dan ook niet dat ze een grote bijdrage aan het doel van dit onderzoek kunnen opleveren. De kosten en de waarschijnlijk geringe bijdrage hebben de afstudeerder doen besluiten om geen artikelen te selecteren.
Providing differentiated services for multi-class traffic in IP/MPLS over WDM networks	Ja	2008	Nee	
A Network Architecture with High Availability for Real-time Premium Traffic over the Internet	Ja	2008	Nee	
A new lightpath establishing method for dynamic traffic grooming under the overlay model	Ja	2009	Nee	
A scalable QoS routing model for diffserv over MPLS networks	Ja	2007	Nee	
OPERATORS CHALLENGES TOWARD BANDWIDTH MANAGEMENT IN DIFFSERV-AWARE TRAFFIC ENGINEERING NETWORKS	Nee	2008	Nee	
Loop-free traffic engineering with path protection in MPLS VPNs	Nee	2008	Nee	
Traffic engineering of MPLS backbone networks in the presence of heterogeneous streams	Nee	2009	Nee	
TRIDENT : An automated approach to traffic engineering in IP-MPLS over ASON-GMPLS networks	Nee	2007	Nee	
Carrier & Provider - Traffic Engineering für Ethernet - Provider Backbone Transport und T-MPLS bieten Zuverlässigkeit für Echtzeit-Services	Nee	2007	Nee	
Special Issue - Network Systems Architecture - Path-Computation-Element-Based Architecture for Interdomain MPLS-GMPLS Traffic Engineering	Nee	2007	Nee	

Conclusie artikelen

Alleen bij Picarta zijn artikelen recenter dan januari 2007 gevonden, deze zijn echter niet interessant bevonden. Daarom is besloten om geen artikelen voor dit onderzoek te gebruiken.

Netwerkconfiguraties en topologieën behorende bij het onderzoek: Hoe kunnen Traffic Engineering technieken worden ingezet voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?




```
mpls label protocol ldp
mpls traffic-eng tunnels
!
interface Tunnel1
 bandwidth 1000000
 ip unnumbered Loopback0
 tunnel destination 4.4.4.4
 tunnel mode mpls traffic-eng
 tunnel mpls traffic-eng autoroute announce
 tunnel mpls traffic-eng priority 0 0
 tunnel mpls traffic-eng bandwidth  1000
 tunnel mpls traffic-eng fast-reroute
 tunnel mpls traffic-eng path-option 10 explicit name tun1
 no routing dynamic
!
```

Versie: 1.0 Definitief

Auteur:Sebastiaan van de Grint (studentnummer 4401)

Opdrachtgever: Richard Schmidt
Blok: TI-dt G3 Afstuderen

Den Haag, 29 maart 2010

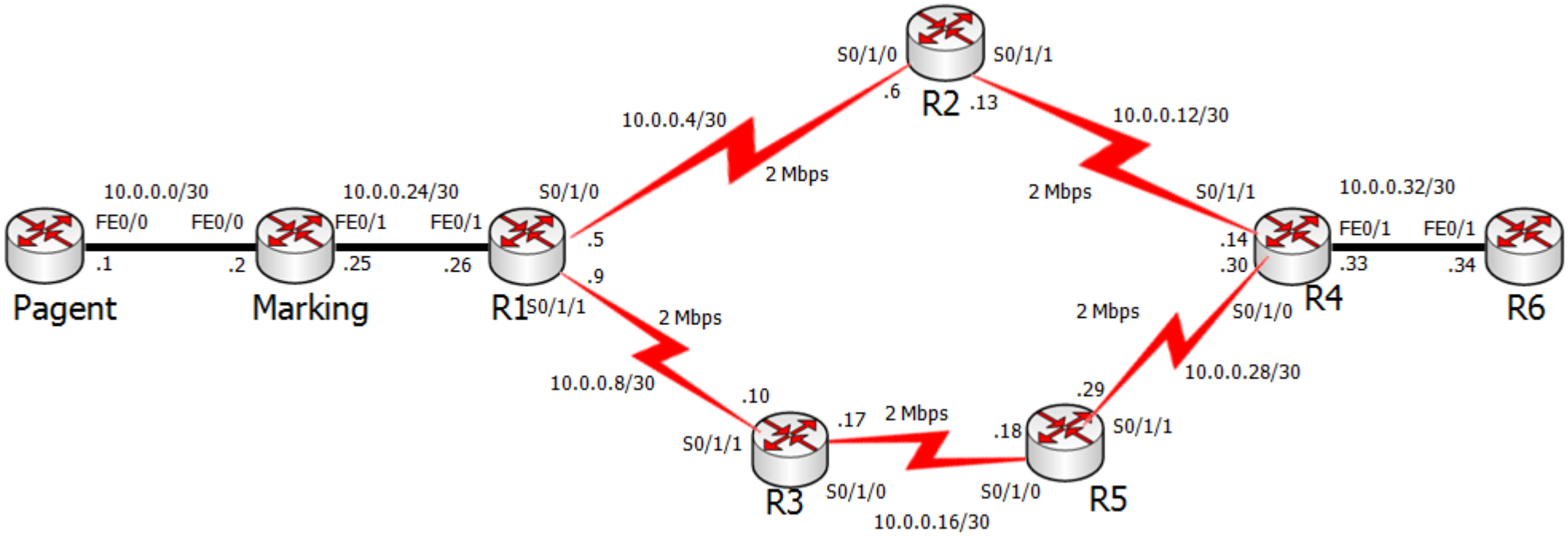
Inhoudsopgave Pagina

1. Netwerk Unequal cost load sharing

Hoofdstuk 1.1 geeft de netwerktopologie voor het netwerk met Unequal cost load sharing. In hoofdstuk 1.2 worden de configuraties van de routers in de situatie zonder MPLS Traffic Engineering gegeven. In hoofdstuk 1.3 worden de configuraties van de routers in de situatie met MPLS Traffic Engineering gegeven.

1.1 Netwerktopologie Unequal cost load sharing

In figuur 1 wordt de netwerk topologie voor Unequal cost load sharing weergegeven. De Pagent router is van het type 2621, de overige routers zijn van het type 2801.



Figuur 1. Netwerk topologie voor Unequal cost load sharing

1.2 Configuraties van de routers in de situatie zonder MPLS Traffic Engineering

Alle router configuraties worden hierna gegeven, voor de overzichtelijkheid begint elke router configuratie op een nieuwe pagina.

Configuratie router Pagent

```
hostname Pagent
!
ip cef
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.1 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 no shutdown
!
interface Serial0/0
 no ip address
 shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 duplex auto
 speed auto
 shutdown
!
interface Serial0/1
no ip address
 shutdown
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 10.0.0.0 0.0.0.3 area 0
```

Configuratie router Marking

```
hostname Marking
!
ip cef
!
class-map match-any allPagentTraffic
 match protocol http
 match protocol pop3
 match protocol smtp
 match protocol telnet
 match protocol ftp
class-map match-all ospf
 match protocol ospf
!
policy-map policingpolicy
 class allPagentTraffic
  set precedence 3
  police rate 4000000
  exceed-action drop
 class ospf
  set precedence 7
 class class-default
  police rate 8000
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.2 255.255.255.252
 ip nbar protocol-discovery
 duplex auto
 speed auto
 no shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 ip address 10.0.0.25 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 service-policy output policingpolicy
 no shutdown
!
interface Serial0/1/0
 no ip address
 shutdown
!
interface Serial0/1/1
 no ip address
 shutdown
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 10.0.0.0 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.24 0.0.0.3 area 0
```

Configuratie router R1

```
hostname R1
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
!
interface Loopback0
 ip address 1.1.1.1 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 no ip address
 shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 ip address 10.0.0.26 255.255.255.252
 ip ospf cost 10000
 duplex auto
 speed auto
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 no shutdown
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.5 255.255.255.252
 ip load-sharing per-packet
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 clock rate 2000000
 no shutdown
!
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.9 255.255.255.252
 ip load-sharing per-packet
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 clock rate 2000000
 no shutdown
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 1.1.1.1 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.4 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.8 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.24 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R2

```
hostname R2
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
!
interface Loopback0
 ip address 2.2.2.2 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.6 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 no shutdown
!
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.13 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 no shutdown
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 2.2.2.2 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.4 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.12 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R3

```
hostname R3
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
!
interface Loopback0
 ip address 3.3.3.3 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.17 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 clock rate 2000000
 no shutdown
!
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.10 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 clock rate 2000000
 no shutdown
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 3.3.3.3 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.8 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.16 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R4

```
hostname R4
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
!
interface Loopback0
 ip address 4.4.4.4 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface FastEthernet0/1
 ip address 10.0.0.33 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 no shutdown
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.30 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 clock rate 2000000
 no shutdown
!
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.14 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 clock rate 2000000
 no shutdown
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 4.4.4.4 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.12 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.28 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.32 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R5

```
hostname R5
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
!
interface Loopback0
 ip address 5.5.5.5 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.18 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 clock rate 2000000
 no shutdown
!
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.29 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 clock rate 2000000
 no shutdown
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 5.5.5.5 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.16 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.28 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R6

```
hostname R6
!
ip cef
!
interface Loopback0
 ip address 6.6.6.6 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface FastEthernet0/1
 ip address 10.0.0.34 255.255.255.252
 ip nbar protocol-discovery
 duplex auto
 speed auto
 no shutdown
!
interface Serial0/1/0
 no ip address
 shutdown
 clock rate 2000000
!
interface Serial0/1/1
 no ip address
 shutdown
 clock rate 2000000
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 6.6.6.6 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.32 0.0.0.3 area 0
```

1.3 Configuraties van de routers in de situatie met MPLS Traffic Engineering

Alle router configuraties worden hierna gegeven, voor de overzichtelijkheid begint elke router configuratie op een nieuwe pagina. De configuratie van router Pagent, router Marking en router R6 is niet gewijzigd ten opzichte van de situatie zonder MPLS Traffic Engineering. Voor de volledigheid zijn deze configuraties toch opgenomen.

Configuratie router Pagent

```
hostname Pagent
!
ip cef
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.1 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 no shutdown
!
interface Serial0/0
 no ip address
 shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 duplex auto
 speed auto
 shutdown
!
interface Serial0/1
no ip address
 shutdown
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 10.0.0.0 0.0.0.3 area 0
```

Configuratie router Marking

```
hostname Marking
!
ip cef
!
class-map match-any allPagentTraffic
 match protocol http
 match protocol pop3
 match protocol smtp
 match protocol telnet
 match protocol ftp
class-map match-all ospf
 match protocol ospf
!
policy-map policingpolicy
 class allPagentTraffic
  set precedence 3
  police rate 4000000
  exceed-action drop
 class ospf
  set precedence 7
 class class-default
  police rate 8000
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.2 255.255.255.252
 ip nbar protocol-discovery
 duplex auto
 speed auto
 no shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 ip address 10.0.0.25 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 service-policy output policingpolicy
 no shutdown
!
interface Serial0/1/0
 no ip address
 shutdown
!
interface Serial0/1/1
 no ip address
 shutdown
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 10.0.0.0 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.24 0.0.0.3 area 0
```

Configuratie router R1

```
hostname R1
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
mpls traffic-eng tunnels
!
interface Tunnel1
 bandwidth 2000
 ip unnumbered Loopback0
 ip load-sharing per-packet
 tunnel destination 4.4.4.4
 tunnel mode mpls traffic-eng
 tunnel mpls traffic-eng autoroute announce
 tunnel mpls traffic-eng priority 0 0
 tunnel mpls traffic-eng bandwidth 2000
 tunnel mpls traffic-eng path-option 10 explicit name tun1
 no routing dynamic
!
interface Tunnel2
 bandwidth 2000
 ip unnumbered Loopback0
 ip load-sharing per-packet
 tunnel destination 4.4.4.4
 tunnel mode mpls traffic-eng
 tunnel mpls traffic-eng autoroute announce
 tunnel mpls traffic-eng priority 0 0
 tunnel mpls traffic-eng bandwidth 2000
 tunnel mpls traffic-eng path-option 10 explicit name tun2
 no routing dynamic
!
interface Loopback0
 ip address 1.1.1.1 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface FastEthernet0/1
 ip address 10.0.0.26 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 no shutdown
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.5 255.255.255.252
 ip load-sharing per-packet
 mpls ip
```

```
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 ip rsvp bandwidth 2000
 no shutdown
!
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.9 255.255.255.252
 ip load-sharing per-packet
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 ip rsvp bandwidth 2000
 no shutdown
!
router ospf 1
 mpls traffic-eng router-id Loopback0
 mpls traffic-eng area 0
 log-adjacency-changes
 network 1.1.1.1 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.4 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.8 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.24 0.0.0.3 area 0
!
ip explicit-path name tun1 enable
 next-address 10.0.0.6
 next-address 10.0.0.14
!
ip explicit-path name tun2 enable
 next-address 10.0.0.10
 next-address 10.0.0.18
 next-address 10.0.0.30
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R2

```
hostname R2
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
mpls traffic-eng tunnels
!
interface Loopback0
 ip address 2.2.2.2 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 no ip address
 shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 shutdown
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.6 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 ip rsvp bandwidth 2000
 clock rate 2000000
 no shutdown
!
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.13 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 ip rsvp bandwidth 2000
 clock rate 2000000
 no shutdown
!
router ospf 1
 mpls traffic-eng router-id Loopback0
 mpls traffic-eng area 0
 log-adjacency-changes
 network 2.2.2.2 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.4 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.12 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R3

```
hostname R3
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
mpls traffic-eng tunnels
!
interface Loopback0
 ip address 3.3.3.3 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 no ip address
 shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 shutdown
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.17 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 ip rsvp bandwidth 2000
 no shutdown
!
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.10 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 ip rsvp bandwidth 2000
 no shutdown
!
router ospf 1
 mpls traffic-eng router-id Loopback0
 mpls traffic-eng area 0
 log-adjacency-changes
 network 3.3.3.3 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.8 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.16 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R4

```
hostname R4
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
mpls traffic-eng tunnels
!
interface Loopback0
 ip address 4.4.4.4 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 no ip address
 shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 ip address 10.0.0.33 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 no shutdown
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.30 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 ip rsvp bandwidth 2000
 clock rate 2000000
 no shutdown
!
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.14 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 ip rsvp bandwidth 2000
 no shutdown
!
router ospf 1
 mpls traffic-eng router-id Loopback0
 mpls traffic-eng area 0
 log-adjacency-changes
 network 4.4.4.4 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.12 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.28 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.32 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R5

```
hostname R5
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
mpls traffic-eng tunnels
!
interface Loopback0
 ip address 5.5.5.5 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 no ip address
 shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 shutdown
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.18 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 ip rsvp bandwidth 2000
 clock rate 2000000
 no shutdown
!
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.29 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 ip rsvp bandwidth 2000
 no shutdown
!
router ospf 1
 mpls traffic-eng router-id Loopback0
 mpls traffic-eng area 0
 log-adjacency-changes
 network 5.5.5.5 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.16 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.28 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R6

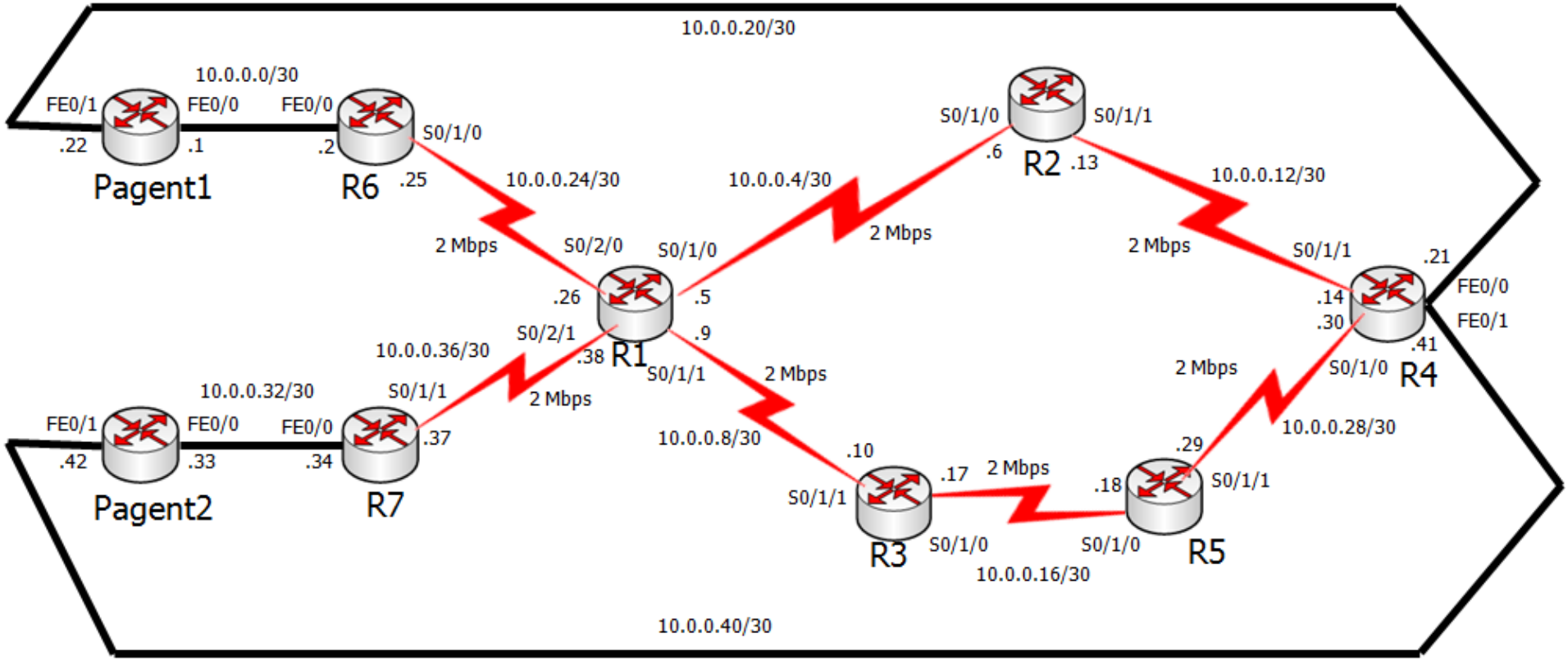
```
hostname R6
!
ip cef
!
interface Loopback0
 ip address 6.6.6.6 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface FastEthernet0/1
 ip address 10.0.0.34 255.255.255.252
 ip nbar protocol-discovery
 duplex auto
 speed auto
 no shutdown
!
interface Serial0/1/0
 no ip address
 shutdown
 clock rate 2000000
!
interface Serial0/1/1
 no ip address
 shutdown
 clock rate 2000000
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 6.6.6.6 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.32 0.0.0.3 area 0
```

2. Netwerk DiffServ Traffic Engineering

Hoofdstuk 2.1 geeft de netwerktopologie voor het netwerk met DiffServ Traffic Engineering. In hoofdstuk 2.2 worden de configuraties van de routers in de situatie zonder MPLS Traffic Engineering gegeven. In hoofdstuk 2.3 worden de configuraties van de routers in de situatie met MPLS Traffic Engineering maar zonder DiffServ Traffic Engineering gegeven. In hoofdstuk 2.4 worden de configuraties van de routers in de situatie met DiffServ Traffic Engineering gegeven.

2.1 Netwerktopologie Unequal cost load sharing

In figuur 2 geeft de netwerk topologie voor DiffServ Traffic Engineering weer. Beide Pagent routers zijn van het type 2621, de overige routers zijn van het type 2801.



Figuur 2. Netwerk topologie voor DiffServ Traffic Engineering

2.2 Configuraties van de routers in de situatie zonder MPLS Traffic Engineering

Alle router configuraties worden hierna gegeven, voor de overzichtelijkheid begint elke router configuratie op een nieuwe pagina.

Configuratie router Pagent1

```
hostname Pagent1
!
ip cef
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.1 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 no shutdown
!
interface Serial0/0
 no ip address
 shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 ip address 10.0.0.22 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 no shutdown
!
interface Serial0/1
no ip address
 shutdown
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 10.0.0.0 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.20 0.0.0.3 area 0
```

Configuratie router Pagent2

```
hostname Pagent2
!
ip cef
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.33 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 no shutdown
!
interface Serial0/0
 no ip address
 shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 ip address 10.0.0.42 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 no shutdown
!
interface Serial0/1
no ip address
 shutdown
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 10.0.0.32 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.42 0.0.0.3 area 0
!
```

Configuratie router R1

```
hostname R1
!
ip cef
mpls label protocol ldp
!
class-map match-all MPLSexp5
 match mpls experimental topmost 5
!
policy-map llq
 class MPLSexp5
  priority percent 50 1875
 class class-default
  bandwidth remaining percent 100
!
interface Loopback0
 ip address 1.1.1.1 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 duplex auto
 speed auto
 shutdown
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.5 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 clock rate 2000000
 service-policy output llq
 no shutdown
!
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.9 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 clock rate 2000000
 service-policy output llq
 no shutdown
!
interface Serial0/2/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.26 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 clock rate 2000000
 no shutdown
```

```
!
interface Serial0/2/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.38 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 clock rate 2000000
 no shutdown
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 1.1.1.1 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.4 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.8 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.24 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.36 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R2

```
hostname R2
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
!
class-map match-all MPLSexp5
 match mpls experimental topmost 5
!
policy-map llq
 class MPLSexp5
  priority percent 50 1875
 class class-default
  bandwidth remaining percent 100

interface Loopback0
 ip address 2.2.2.2 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 no ip address
 shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 shutdown
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.6 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 clock rate 2000000
 no shutdown
!
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.13 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 clock rate 2000000
 service-policy output llq
 no shutdown
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 2.2.2.2 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.4 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.12 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R3

```
hostname R3
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
!
interface Loopback0
 ip address 3.3.3.3 255.255.255.255
!
class-map match-all MPLSexp5
 match mpls experimental topmost 5
!
policy-map llq
 class MPLSexp5
  priority percent 50 1875
 class class-default
  bandwidth remaining percent 100
!
interface FastEthernet0/0
 no ip address
 shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 shutdown
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.17 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 clock rate 2000000
 service-policy output llq
 no shutdown
!
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.10 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 clock rate 2000000
 no shutdown
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 3.3.3.3 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.8 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.16 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R4

```
hostname R4
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
!
class-map match-all precedence5
 match precedence 5
class-map match-all MPLSexp5
 match mpls experimental topmost 5
!
policy-map ExpToPrec
 class MPLSexp5
  set precedence 5
policy-map llq
 class precedence5
  priority percent 50 1875
 class class-default
  bandwidth remaining percent 100
!
interface Loopback0
 ip address 4.4.4.4 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.21 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 service-policy output llq
 no shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 ip address 10.0.0.41 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 service-policy output llq
 no shutdown
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.30 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 clock rate 2000000
 service-policy input ExpToPrec
 no shutdown
!
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.14 255.255.255.252
 mpls ip
```

```
 mpls mtu 1504
 clock rate 2000000
 service-policy input ExpToPrec
 no shutdown
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 4.4.4.4 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.12 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.28 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.20 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.40 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R5

```
hostname R5
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
!
interface Loopback0
 ip address 5.5.5.5 255.255.255.255
!
class-map match-all MPLSexp5
 match mpls experimental topmost 5
policy-map llq
 class MPLSexp5
  priority percent 50 1875
 class class-default
  bandwidth remaining percent 100
!
interface FastEthernet0/0
 no ip address
 shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 shutdown
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.18 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 clock rate 2000000
 no shutdown
!
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.29 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 clock rate 2000000
 service-policy output llq
 no shutdown
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 3.3.3.3 0.0.0.0 area 0
 network 5.5.5.5 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.16 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.28 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R6

```
hostname R6
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
!
interface Loopback0
 ip address 6.6.6.6 255.255.255.255
!
class-map match-all precedence0
 match precedence 0
class-map match-all precedence5
 match precedence 5
class-map match-all MPLSexp5
 match mpls experimental topmost 5
!
policy-map PrecToMPLSexp
 class precedence5
  set mpls experimental 5
 class precedence0
  set mpls experimental 0
policy-map llq
 class MPLSexp5
  priority percent 50 1875
 class class-default
  bandwidth remaining percent 100
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.2 255.255.255.252
 ip ospf cost 10000
 duplex auto
 speed auto
 service-policy input PrecToMPLSexp
 no shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 duplex auto
 speed auto
 shutdown
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.25 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 clock rate 2000000
 service-policy output llq
 no shutdown
!
interface Serial0/1/1
 no ip address
 shutdown
!
```

```
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 6.6.6.6 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.0 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.24 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R7

```
hostname R7
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
!
interface Loopback0
 ip address 7.7.7.7 255.255.255.255
!
class-map match-all precedence0
 match precedence 0
class-map match-all precedence5
 match precedence 5
class-map match-all MPLSexp5
 match mpls experimental topmost 5
!
policy-map PrecToMPLSexp
 class precedence5
  set mpls experimental 5
 class precedence0
  set mpls experimental 0
policy-map llq
 class MPLSexp5
  priority percent 50 1875
 class class-default
  bandwidth remaining percent 100
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.34 255.255.255.252
 ip ospf cost 10000
 duplex auto
 speed auto
 service-policy input PrecToMPLSexp
 no shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 duplex auto
 speed auto
 shutdown
!
interface Serial0/1/0
 no ip address
 shutdown
!
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.37 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 clock rate 2000000
 service-policy output llq
 no shutdown
!
```

```
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 7.7.7.7 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.32 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.36 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

2.3 Configuraties van de routers in de situatie met MPLS Traffic Engineering maar zonder DiffServ Traffic Engineering

Alle router configuraties worden hierna gegeven, voor de overzichtelijkheid begint elke router configuratie op een nieuwe pagina. De configuratie van router Pagent1 en router Pagent2 is niet gewijzigd ten opzichte van de situatie zonder MPLS Traffic Engineering. Voor de volledigheid zijn deze configuraties toch opgenomen.

Configuratie router Pagent1

```
hostname Pagent1
ip cef
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.1 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 no shutdown
!
interface Serial0/0
 no ip address
 shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 ip address 10.0.0.22 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 no shutdown
!
interface Serial0/1
no ip address
 shutdown
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 10.0.0.0 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.20 0.0.0.3 area 0
```

Configuratie router Pagent2

```
hostname Pagent2
!
ip cef
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.33 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 no shutdown
!
interface Serial0/0
 no ip address
 shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 ip address 10.0.0.42 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 no shutdown
!
interface Serial0/1
no ip address
 shutdown
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 10.0.0.32 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.42 0.0.0.3 area 0
!
```

Configuratie router R1

```
hostname R1
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
!
mpls traffic-eng tunnels
!
class-map match-all MPLSexp5
 match mpls experimental topmost 5
!
policy-map llq
 class MPLSexp5
  priority percent 50 1875
 class class-default
  bandwidth remaining percent 100
!
interface Loopback0
 ip address 1.1.1.1 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 duplex auto
 speed auto
 shutdown
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.5 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 service-policy output llq
 ip rsvp bandwidth 2000
 no shutdown
!
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.9 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 service-policy output llq
 ip rsvp bandwidth 2000
 no shutdown
!
```

```
interface Serial0/2/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.26 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 clock rate 2000000
 mpls traffic-eng tunnels
 ip rsvp bandwidth 2000
 no shutdown
!
interface Serial0/2/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.38 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 clock rate 2000000
 mpls traffic-eng tunnels
 ip rsvp bandwidth 2000
 no shutdown
!
router ospf 1
 mpls traffic-eng router-id Loopback0
 mpls traffic-eng area 0
 log-adjacency-changes
 network 1.1.1.1 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.4 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.8 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.24 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.36 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R2

```
hostname R2
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
mpls traffic-eng tunnels
!
class-map match-all MPLSexp5
 match mpls experimental topmost 5
!
policy-map llq
 class MPLSexp5
  priority percent 50 1875
 class class-default
  bandwidth remaining percent 100

interface Loopback0
 ip address 2.2.2.2 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.6 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 ip rsvp bandwidth 2000
 no shutdown
!
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.13 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 service-policy output llq
 ip rsvp bandwidth 2000
 no shutdown
!
router ospf 1
 mpls traffic-eng router-id Loopback0
```

```
 mpls traffic-eng area 0
 log-adjacency-changes
 network 2.2.2.2 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.4 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.12 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R3

```
hostname R3
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
mpls traffic-eng tunnels
!
interface Loopback0
 ip address 3.3.3.3 255.255.255.255
!
class-map match-all MPLSexp5
 match mpls experimental topmost 5
!
policy-map llq
 class MPLSexp5
  priority percent 50 1875
 class class-default
  bandwidth remaining percent 100
!
interface FastEthernet0/0
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.17 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 service-policy output llq
 ip rsvp bandwidth 2000
 no shutdown
!
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.10 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 ip rsvp bandwidth 2000
 no shutdown
!
router ospf 1
 mpls traffic-eng router-id Loopback0
```

```
 mpls traffic-eng area 0
 log-adjacency-changes
 network 3.3.3.3 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.8 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.16 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R4

```
hostname R4
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
!
mpls traffic-eng tunnels
!
class-map match-all precedence5
 match precedence 5
class-map match-all MPLSexp5
 match mpls experimental topmost 5
!
policy-map ExpToPrec
 class MPLSexp5
  set precedence 5
policy-map llq
 class precedence5
  priority percent 50 1875
 class class-default
  bandwidth remaining percent 100
!
interface Loopback0
 ip address 4.4.4.4 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.21 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 service-policy output llq
 no shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 ip address 10.0.0.41 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 service-policy output llq
 no shutdown
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.30 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 service-policy input ExpToPrec
 ip rsvp bandwidth 2000
 no shutdown
!
```

```
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.14 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 service-policy input ExpToPrec
 ip rsvp bandwidth 2000
 no shutdown
!
router ospf 1
 mpls traffic-eng router-id Loopback0
 mpls traffic-eng area 0
 log-adjacency-changes
 network 4.4.4.4 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.12 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.28 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.20 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.40 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R5

```
hostname R5
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
mpls traffic-eng tunnels
!
interface Loopback0
 ip address 5.5.5.5 255.255.255.255
!
class-map match-all MPLSexp5
 match mpls experimental topmost 5
policy-map llq
 class MPLSexp5
  priority percent 50 1875
 class class-default
  bandwidth remaining percent 100
!
interface FastEthernet0/0
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.18 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 ip rsvp bandwidth 2000
 no shutdown
!
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.29 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 service-policy output llq
 ip rsvp bandwidth 2000
 no shutdown
!
router ospf 1
 mpls traffic-eng router-id Loopback0
 mpls traffic-eng area 0
```

```
 log-adjacency-changes
 network 3.3.3.3 0.0.0.0 area 0
 network 5.5.5.5 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.16 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.28 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R6

```
hostname R6
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
!
mpls traffic-eng tunnels
!
interface Loopback0
 ip address 6.6.6.6 255.255.255.255
!
class-map match-all precedence0
 match precedence 0
class-map match-all precedence5
 match precedence 5
class-map match-all MPLSexp5
 match mpls experimental topmost 5
!
policy-map PrecToMPLSexp
 class precedence5
  set mpls experimental 5
 class precedence0
  set mpls experimental 0
policy-map llq
 class MPLSexp5
  priority percent 50 1875
 class class-default
  bandwidth remaining percent 100
!
interface Tunnel1
 bandwidth 2000
 ip unnumbered Loopback0
 tunnel destination 4.4.4.4
 tunnel mode mpls traffic-eng
 tunnel mpls traffic-eng autoroute announce
 tunnel mpls traffic-eng priority 0 0
 tunnel mpls traffic-eng bandwidth 1000
 tunnel mpls traffic-eng path-option 10 dynamic
 no routing dynamic
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.2 255.255.255.252
 ip ospf cost 10000
 duplex auto
 speed auto
 service-policy input PrecToMPLSexp
 no shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 duplex auto
 speed auto
 shutdown
!
```

```
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.25 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 service-policy output llq
 ip rsvp bandwidth 2000
 no shutdown
!
interface Serial0/1/1
 no ip address
 shutdown
!
router ospf 1
 mpls traffic-eng router-id Loopback0
 mpls traffic-eng area 0
 log-adjacency-changes
 network 6.6.6.6 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.0 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.24 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R7

```
hostname R7
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
!
mpls traffic-eng tunnels
!
interface Loopback0
 ip address 7.7.7.7 255.255.255.255
!
class-map match-all precedence0
 match precedence 0
class-map match-all precedence5
 match precedence 5
class-map match-all MPLSexp5
 match mpls experimental topmost 5
!
policy-map PrecToMPLSexp
 class precedence5
  set mpls experimental 5
 class precedence0
  set mpls experimental 0
policy-map llq
 class MPLSexp5
  priority percent 50 1875
 class class-default
  bandwidth remaining percent 100
!
interface Tunnel2
 bandwidth 2000
 ip unnumbered Loopback0
 tunnel destination 4.4.4.4
 tunnel mode mpls traffic-eng
 tunnel mpls traffic-eng autoroute announce
 tunnel mpls traffic-eng priority 0 0
 tunnel mpls traffic-eng bandwidth 1000
 tunnel mpls traffic-eng path-option 10 dynamic
 no routing dynamic
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.34 255.255.255.252
 ip ospf cost 10000
 duplex auto
 speed auto
 service-policy input PrecToMPLSexp
 no shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 duplex auto
 speed auto
 shutdown
!
```

```
interface Serial0/1/0
 no ip address
 shutdown
!
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.37 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 service-policy output llq
 ip rsvp bandwidth 2000
 no shutdown
!
router ospf 1
 mpls traffic-eng router-id Loopback0
 mpls traffic-eng area 0
 log-adjacency-changes
 network 7.7.7.7 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.32 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.36 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

2.4 Configuraties van de routers in de situatie met DiffServ Traffic Engineering

Alle router configuraties worden hierna gegeven, voor de overzichtelijkheid begint elke router configuratie op een nieuwe pagina. De configuratie van router Pagent1 en router Pagent2 is niet gewijzigd ten opzichte van de voorgaande situaties. Voor de volledigheid zijn deze configuraties toch opgenomen.

Configuratie router Pagent1

```
hostname Pagent1
!
ip cef
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.1 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 no shutdown
!
interface Serial0/0
 no ip address
 shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 ip address 10.0.0.22 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 no shutdown
!
interface Serial0/1
no ip address
 shutdown
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 10.0.0.0 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.20 0.0.0.3 area 0
```

Configuratie router Pagent2

```
hostname Pagent2
!
ip cef
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.33 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 no shutdown
!
interface Serial0/0
 no ip address
 shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 ip address 10.0.0.42 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 no shutdown
!
interface Serial0/1
no ip address
 shutdown
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 10.0.0.32 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.42 0.0.0.3 area 0
!
```

Configuratie router R1

```
hostname R1
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
!
mpls traffic-eng tunnels
!
class-map match-all MPLSexp5
 match mpls experimental topmost 5
!
policy-map llq
 class MPLSexp5
  priority percent 50 1875
 class class-default
  bandwidth remaining percent 100
!
interface Loopback0
 ip address 1.1.1.1 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 duplex auto
 speed auto
 shutdown
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.5 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 service-policy output llq
 ip rsvp bandwidth 2000 sub-pool 1000
 no shutdown
!
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.9 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 service-policy output llq
 ip rsvp bandwidth 2000 sub-pool 1000
 no shutdown
!
```

```
interface Serial0/2/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.26 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 clock rate 2000000
 mpls traffic-eng tunnels
 ip rsvp bandwidth 2000 sub-pool 1000
 no shutdown
!
interface Serial0/2/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.38 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 clock rate 2000000
 mpls traffic-eng tunnels
 ip rsvp bandwidth 2000 sub-pool 1000
 no shutdown
!
router ospf 1
 mpls traffic-eng router-id Loopback0
 mpls traffic-eng area 0
 log-adjacency-changes
 network 1.1.1.1 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.4 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.8 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.24 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.36 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R2

```
hostname R2
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
mpls traffic-eng tunnels
!
class-map match-all MPLSexp5
 match mpls experimental topmost 5
!
policy-map llq
 class MPLSexp5
  priority percent 50 1875
 class class-default
  bandwidth remaining percent 100

interface Loopback0
 ip address 2.2.2.2 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.6 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 ip rsvp bandwidth 2000 sub-pool 1000
 no shutdown
!
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.13 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 service-policy output llq
 ip rsvp bandwidth 2000 sub-pool 1000
 no shutdown
!
router ospf 1
 mpls traffic-eng router-id Loopback0
```

```
 mpls traffic-eng area 0
 log-adjacency-changes
 network 2.2.2.2 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.4 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.12 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R3

```
hostname R3
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
mpls traffic-eng tunnels
!
interface Loopback0
 ip address 3.3.3.3 255.255.255.255
!
class-map match-all MPLSexp5
 match mpls experimental topmost 5
!
policy-map llq
 class MPLSexp5
  priority percent 50 1875
 class class-default
  bandwidth remaining percent 100
!
interface FastEthernet0/0
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.17 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 service-policy output llq
 ip rsvp bandwidth 2000 sub-pool 1000
 no shutdown
!
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.10 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 ip rsvp bandwidth 2000 sub-pool 1000
 no shutdown
!
router ospf 1
 mpls traffic-eng router-id Loopback0
```

```
 mpls traffic-eng area 0
 network 3.3.3.3 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.8 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.16 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R4

```
hostname R4
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
!
mpls traffic-eng tunnels
!
class-map match-all precedence5
 match precedence 5
class-map match-all MPLSexp5
 match mpls experimental topmost 5
!
policy-map ExpToPrec
 class MPLSexp5
  set precedence 5
policy-map llq
 class precedence5
  priority percent 50 1875
 class class-default
  bandwidth remaining percent 100
!
interface Loopback0
 ip address 4.4.4.4 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.21 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 service-policy output llq
 no shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 ip address 10.0.0.41 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 service-policy output llq
 no shutdown
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.30 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 service-policy input ExpToPrec
 ip rsvp bandwidth 2000 sub-pool 1000
 no shutdown
!
```

```
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.14 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 service-policy input ExpToPrec
 ip rsvp bandwidth 2000 sub-pool 1000
 no shutdown
!
router ospf 1
 mpls traffic-eng router-id Loopback0
 mpls traffic-eng area 0
 log-adjacency-changes
 network 4.4.4.4 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.12 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.28 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.20 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.40 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R5

```
hostname R5
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
mpls traffic-eng tunnels
!
interface Loopback0
 ip address 5.5.5.5 255.255.255.255
!
class-map match-all MPLSexp5
 match mpls experimental topmost 5
policy-map llq
 class MPLSexp5
  priority percent 50 1875
 class class-default
  bandwidth remaining percent 100
!
interface FastEthernet0/0
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.18 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 ip rsvp bandwidth 2000 sub-pool 1000
 no shutdown
!
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.29 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 service-policy output llq
 ip rsvp bandwidth 2000 sub-pool 1000
 no shutdown
!
router ospf 1
 mpls traffic-eng router-id Loopback0
 mpls traffic-eng area 0
```

```
 log-adjacency-changes
 network 3.3.3.3 0.0.0.0 area 0
 network 5.5.5.5 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.16 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.28 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R6

```
hostname R6
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
mpls traffic-eng tunnels
!
interface Loopback0
 ip address 6.6.6.6 255.255.255.255
!
class-map match-all precedence0
 match precedence 0
class-map match-all precedence5
 match precedence 5
class-map match-all MPLSexp5
 match mpls experimental topmost 5
!
policy-map PrecToMPLSexp
 class precedence5
  set mpls experimental 5
 class precedence0
  set mpls experimental 0
policy-map llq
 class MPLSexp5
  priority percent 50 1875
 class class-default
  bandwidth remaining percent 100
!
interface Tunnel1
 bandwidth 300
 ip unnumbered Loopback0
 tunnel destination 4.4.4.4
 tunnel mode mpls traffic-eng
 tunnel mpls traffic-eng autoroute announce
 tunnel mpls traffic-eng priority 0 0
 tunnel mpls traffic-eng bandwidth 300
 tunnel mpls traffic-eng path-option 10 dynamic
 no routing dynamic
!
interface Tunnel2
 bandwidth 700
 ip unnumbered Loopback0
 tunnel destination 4.4.4.4
 tunnel mode mpls traffic-eng
 tunnel mpls traffic-eng autoroute announce
 tunnel mpls traffic-eng priority 0 0
 tunnel mpls traffic-eng bandwidth sub-pool 700
 tunnel mpls traffic-eng path-option 10 dynamic
 no routing dynamic
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.2 255.255.255.252
 ip ospf cost 10000
 duplex auto
```

```
 speed auto
 service-policy input PrecToMPLSexp
 no shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 duplex auto
 speed auto
 shutdown
!
interface Serial0/1/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.25 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 service-policy output llq
 ip rsvp bandwidth 2000 sub-pool 1000
 no shutdown
!
interface Serial0/1/1
 no ip address
 shutdown
!
router ospf 1
 mpls traffic-eng router-id Loopback0
 mpls traffic-eng area 0
 log-adjacency-changes
 network 6.6.6.6 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.0 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.24 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R7

```
hostname R7
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
mpls traffic-eng tunnels
!
interface Loopback0
 ip address 7.7.7.7 255.255.255.255
!
class-map match-all precedence0
 match precedence 0
class-map match-all precedence5
 match precedence 5
class-map match-all MPLSexp5
 match mpls experimental topmost 5
!
policy-map PrecToMPLSexp
 class precedence5
  set mpls experimental 5
 class precedence0
  set mpls experimental 0
policy-map llq
 class MPLSexp5
  priority percent 50 1875
 class class-default
  bandwidth remaining percent 100
!
interface Tunnel3
 bandwidth 300
 ip unnumbered Loopback0
 tunnel destination 4.4.4.4
 tunnel mode mpls traffic-eng
 tunnel mpls traffic-eng autoroute announce
 tunnel mpls traffic-eng priority 0 0
 tunnel mpls traffic-eng bandwidth 300
 tunnel mpls traffic-eng path-option 10 dynamic
 no routing dynamic
!
interface Tunnel4
 bandwidth 700
 ip unnumbered Loopback0
 tunnel destination 4.4.4.4
 tunnel mode mpls traffic-eng
 tunnel mpls traffic-eng autoroute announce
 tunnel mpls traffic-eng priority 0 0
 tunnel mpls traffic-eng bandwidth sub-pool 700
 tunnel mpls traffic-eng path-option 10 dynamic
 no routing dynamic
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.34 255.255.255.252
 ip ospf cost 10000
 duplex auto
```

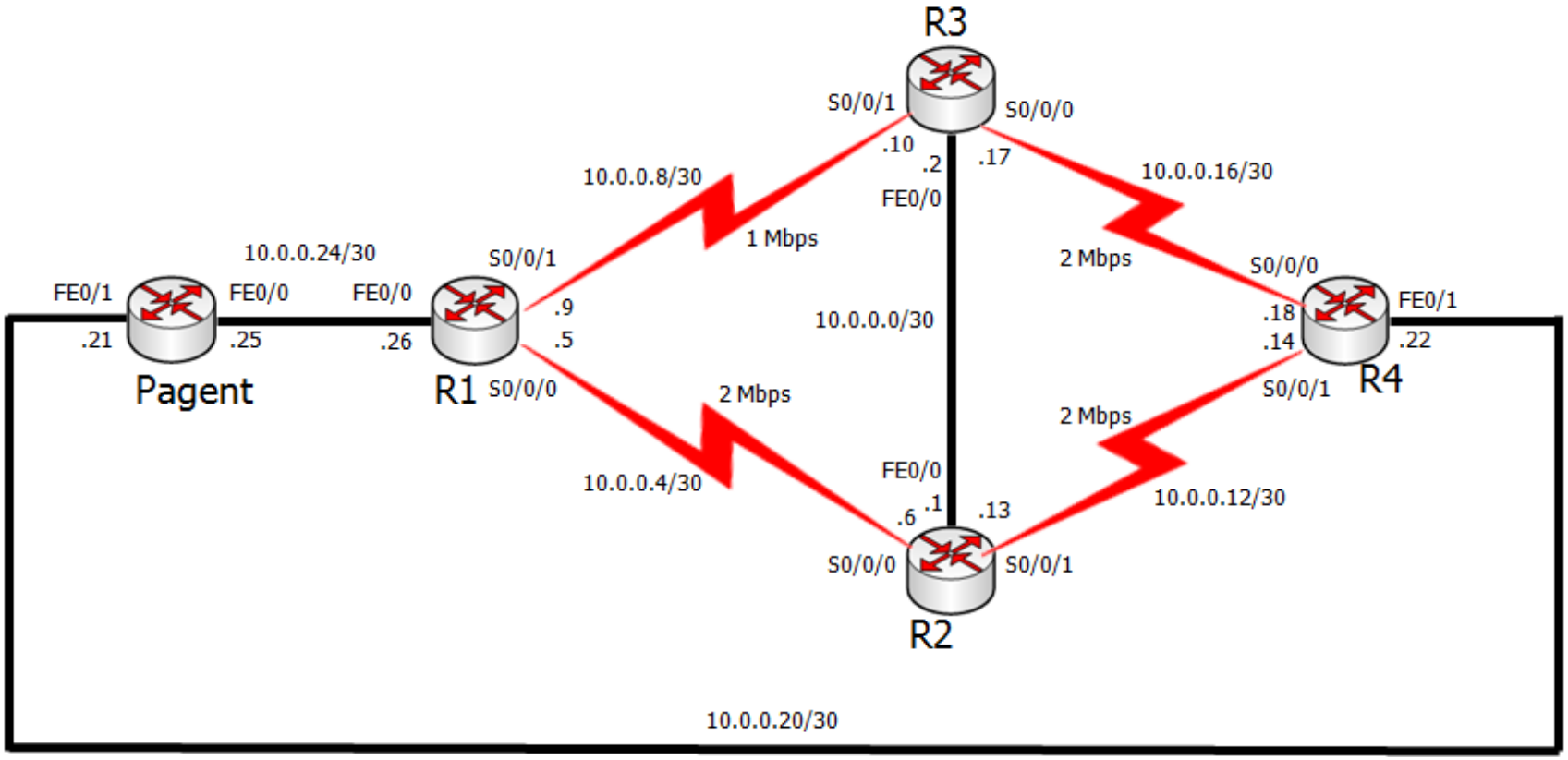
```
 speed auto
 service-policy input PrecToMPLSexp
 no shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 duplex auto
 speed auto
 shutdown
!
interface Serial0/1/0
 no ip address
 shutdown
!
interface Serial0/1/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.37 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu 1504
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 service-policy output llq
 ip rsvp bandwidth 2000 sub-pool 1000
 no shutdown
!
router ospf 1
 mpls traffic-eng router-id Loopback0
 mpls traffic-eng area 0
 log-adjacency-changes
 network 7.7.7.7 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.32 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.36 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

3. Netwerk Recovery en Protection

Hoofdstuk 3.1 geeft de netwerktopologie voor het netwerk met Recovery en Protection. In hoofdstuk 3.2 worden de configuraties van de routers in de situatie zonder MPLS Traffic Engineering gegeven. In hoofdstuk 3.3 worden de configuraties van de routers in de situatie met MPLS Traffic Engineering gegeven.

3.1 Netwerktopologie Recovery en Protection

In figuur 3 wordt de netwerk topologie voor Recovery en Protection weergegeven. De Pagent router is van het type 2621, alle overige routers zijn van het type 2811.



Figuur 3. Netwerk topologie voor Recovery en Protection

3.2 Configuraties van de routers in de situatie zonder MPLS Traffic Engineering

Alle router configuraties worden hierna gegeven, voor de overzichtelijkheid begint elke router configuratie op een nieuwe pagina.

Configuratie router Pagent

```
hostname Pagent1
!
ip cef
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.25 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 no shutdown
!
interface Serial0/0
 no ip address
 shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 ip address 10.0.0.21 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 no shutdown
!
interface Serial0/1
no ip address
 shutdown
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 10.0.0.20 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.24 0.0.0.3 area 0
```

Configuratie router R1

```
hostname R1
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
!
interface Loopback0
 ip address 1.1.1.1 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.26 255.255.255.252
 ip ospf cost 10000
 duplex auto
 speed auto
 mpls mtu override 1508
 mpls ip
 no shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 duplex auto
 speed auto
 shutdown
!
interface Serial0/0/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.5 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu override 1508
 clock rate 2000000
 no shutdown
!
interface Serial0/0/1
 bandwidth 1000
 ip address 10.0.0.9 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu override 1508
 clock rate 1000000
 no shutdown
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 1.1.1.1 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.4 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.8 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.20 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R2

```
hostname R2
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
!
interface Loopback0
 ip address 2.2.2.2 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.1 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 mpls mtu override 1508
 mpls ip
 no shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface Serial0/0/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.6 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu override 1508
 clock rate 2000000
 no shutdown
!
interface Serial0/0/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.13 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu override 1508
 clock rate 2000000
 no shutdown
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 2.2.2.2 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.0 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.4 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.12 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R3

```
hostname R3
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
!
interface Loopback0
 ip address 3.3.3.3 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.2 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 mpls mtu override 1508
 mpls ip
 no shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface Serial0/0/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.17 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu override 1508
 clock rate 2000000
 no shutdown
!
interface Serial0/0/1
 bandwidth 1000
 ip address 10.0.0.10 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu override 1508
 clock rate 1000000
 no shutdown
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 3.3.3.3 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.0 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.8 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.16 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R4

```
hostname R4
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
!
interface Loopback0
 ip address 4.4.4.4 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 no ip address
 duplex auto
 speed auto
 shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 ip address 10.0.0.22 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 no shutdown
!
interface Serial0/0/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.18 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu override 1508
 clock rate 2000000
 no shutdown
!
interface Serial0/0/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.14 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu override 1508
 clock rate 2000000
 no shutdown
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 4.4.4.4 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.12 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.16 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.20 0.0.0.3 area 0
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

3.3 Configuraties van de routers in de situatie met MPLS Traffic Engineering

Alle router configuraties worden hierna gegeven, voor de overzichtelijkheid begint elke router configuratie op een nieuwe pagina. De configuratie van router Pagent is niet gewijzigd ten opzichte van de situatie zonder MPLS Traffic Engineering. Voor de volledigheid is deze configuraties toch opgenomen.

Configuratie router Pagent

```
hostname Pagent1
!
ip cef
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.25 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 no shutdown
!
interface Serial0/0
 no ip address
 shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 ip address 10.0.0.21 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 no shutdown
!
interface Serial0/1
no ip address
 shutdown
!
router ospf 1
 log-adjacency-changes
 network 10.0.0.20 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.24 0.0.0.3 area 0
```

Configuratie router R1

```
hostname R1
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
mpls traffic-eng tunnels
!
interface Tunnel1
 bandwidth 1000000
 ip unnumbered Loopback0
 tunnel destination 4.4.4.4
 tunnel mode mpls traffic-eng
 tunnel mpls traffic-eng autoroute announce
 tunnel mpls traffic-eng priority 0 0
 tunnel mpls traffic-eng bandwidth 1000
 tunnel mpls traffic-eng fast-reroute
 tunnel mpls traffic-eng path-option 10 explicit name tun1
 no routing dynamic
!
interface Tunnel2
 description NNHOP-backup
 ip unnumbered Loopback0
 tunnel destination 4.4.4.4
 tunnel mode mpls traffic-eng
 tunnel mpls traffic-eng path-option 10 explicit name tun2
 no routing dynamic
!
interface Loopback0
 ip address 1.1.1.1 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.26 255.255.255.252
 ip ospf cost 10000
 duplex auto
 speed auto
 no shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 duplex auto
 speed auto
 shutdown
!
interface Serial0/0/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.5 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu override 1508
 mpls traffic-eng tunnels
 mpls traffic-eng backup-path Tunnel2
 clock rate 2000000
 ip rsvp bandwidth 1000
 ip rsvp signalling hello
 ip rsvp signalling hello refresh interval 50
 no shutdown
```

```
!
interface Serial0/0/1
 bandwidth 1000
 ip address 10.0.0.9 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu override 1508
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 1000000
 ip rsvp bandwidth 1000
 ip rsvp signalling hello
 ip rsvp signalling hello refresh interval 50
 no shutdown
!
router ospf 1
 mpls traffic-eng router-id Loopback0
 mpls traffic-eng area 0
 log-adjacency-changes
 network 1.1.1.1 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.4 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.8 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.24 0.0.0.3 area 0
!
ip rsvp signalling hello
!
ip explicit-path name tun1 enable
 next-address 10.0.0.6
 next-address 10.0.0.14
!
ip explicit-path name tun2 enable
 exclude-address 10.0.0.6
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R2

```
hostname R2
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
mpls traffic-eng tunnels
!
interface Loopback0
 ip address 2.2.2.2 255.255.255.255
!
interface Tunnel3
 description NHOP-backup
 ip unnumbered Loopback0
 tunnel destination 4.4.4.4
 tunnel mode mpls traffic-eng
 tunnel mpls traffic-eng path-option 10 explicit name tun3
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.1 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 mpls mtu override 1508
 mpls traffic-eng tunnels
 mpls ip
 ip rsvp bandwidth 1000
 ip rsvp signalling hello
 ip rsvp signalling hello refresh interval 50
 no shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface Serial0/0/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.6 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu override 1508
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 ip rsvp bandwidth 1000
 ip rsvp signalling hello
 ip rsvp signalling hello refresh interval 50
 no shutdown
!
interface Serial0/0/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.13 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu override 1508
 mpls traffic-eng tunnels
 mpls traffic-eng backup-path Tunnel3
```

```
 ip rsvp bandwidth 1000
 ip rsvp signalling hello
 ip rsvp signalling hello refresh interval 50
 clock rate 2000000
 no shutdown
!
router ospf 1
 mpls traffic-eng router-id Loopback0
 mpls traffic-eng area 0
 log-adjacency-changes
 network 2.2.2.2 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.0 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.4 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.12 0.0.0.3 area 0
!
ip rsvp signalling hello
!
ip explicit-path name tun3 enable
 next-address 10.0.0.2
 next-address 10.0.0.18
!
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R3

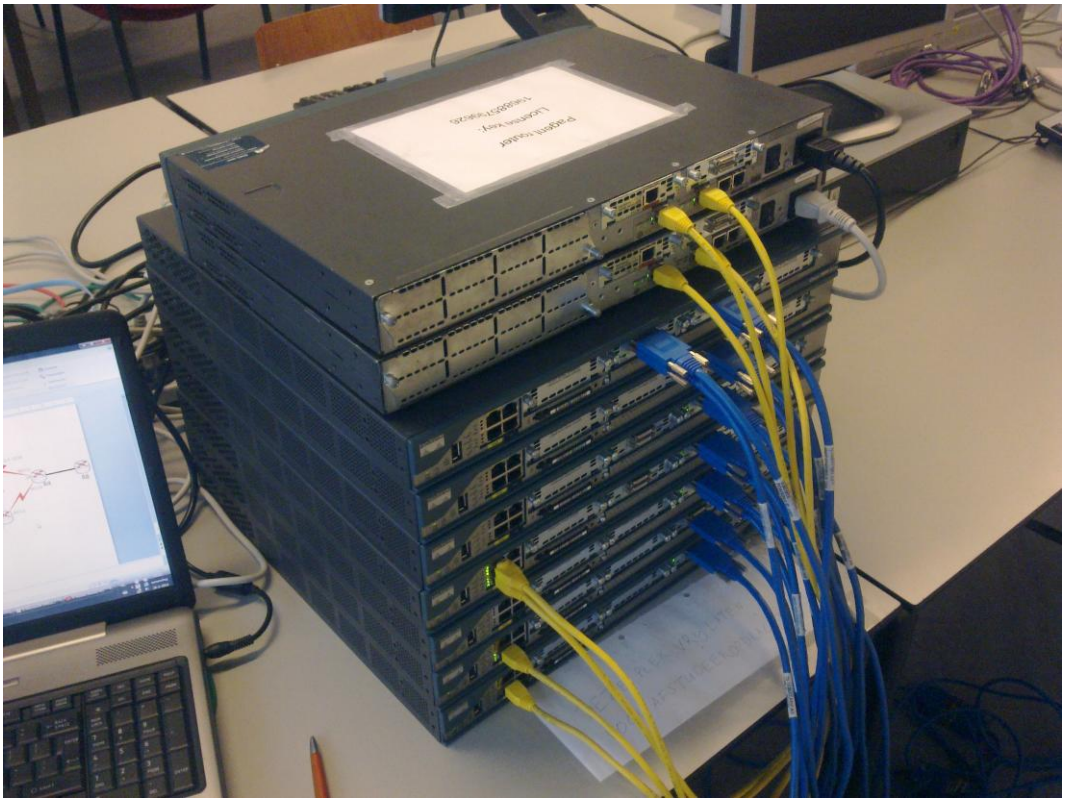
```
hostname R3
!
ip cef
!
mpls label protocol ldp
mpls traffic-eng tunnels
!
interface Loopback0
 ip address 3.3.3.3 255.255.255.255
!
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.2 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu override 1508
 mpls traffic-eng tunnels
 ip rsvp bandwidth 1000
 ip rsvp signalling hello
 ip rsvp signalling hello refresh interval 50
 no shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 shutdown
 duplex auto
 speed auto
!
interface Serial0/0/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.17 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu override 1508
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 ip rsvp bandwidth 1000
 ip rsvp signalling hello
 ip rsvp signalling hello refresh interval 50
 no shutdown
!
interface Serial0/0/1
 bandwidth 1000
 ip address 10.0.0.10 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu override 1508
 mpls traffic-eng tunnels
 ip rsvp bandwidth 1000
 ip rsvp signalling hello
 ip rsvp signalling hello refresh interval 50
 clock rate 1000000
 no shutdown
!
router ospf 1
 mpls traffic-eng router-id Loopback0
```

```
 mpls traffic-eng area 0
 log-adjacency-changes
 network 3.3.3.3 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.0 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.8 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.16 0.0.0.3 area 0
!
ip rsvp signalling hello
mpls ldp router-id Loopback0
```

Configuratie router R4

```
hostname R4
ip cef
!
mpls label protocol ldp
mpls traffic-eng tunnels
!
interface Loopback0
 ip address 4.4.4.4 255.255.255.255
interface FastEthernet0/0
 ip address 10.0.0.22 255.255.255.252
 duplex auto
 speed auto
 no shutdown
!
interface FastEthernet0/1
 no ip address
 shutdown
!
interface Serial0/0/0
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.18 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu override 1508
 mpls traffic-eng tunnels
 ip rsvp bandwidth 1000
 ip rsvp signalling hello
 ip rsvp signalling hello refresh interval 50
 clock rate 2000000
 no shutdown
!
interface Serial0/0/1
 bandwidth 2000
 ip address 10.0.0.14 255.255.255.252
 mpls ip
 mpls mtu override 1508
 mpls traffic-eng tunnels
 clock rate 2000000
 ip rsvp bandwidth 1000
 ip rsvp signalling hello
 ip rsvp signalling hello refresh interval 50
 no shutdown
!
router ospf 1
 mpls traffic-eng router-id Loopback0
 mpls traffic-eng area 0
 log-adjacency-changes
 network 4.4.4.4 0.0.0.0 area 0
 network 10.0.0.12 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.16 0.0.0.3 area 0
 network 10.0.0.20 0.0.0.3 area 0
!
ip rsvp signalling hello
mpls ldp router-id Loopback0
```

Testrapportage behorende bij onderzoek: Hoe kunnen Traffic Engineering technieken worden ingezet voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?



Versie: 1.0 Definitief

Auteur:Sebastiaan van de Grint (studentnummer 4401)

Opdrachtgever: Richard Schmidt
Blok: TI-dt G3 Afstuderen

Den Haag, 29 maart 2010

Inhoudsopgave Pagina

1. Inleiding

Deze rapportage hoort bij het onderzoek: hoe kunnen Traffic Engineering technieken worden ingezet voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering? Dit onderzoek bestaat uit een theoretisch deel en een praktijk deel. In het theoretisch deel is een aantal voorbeeldnetwerken beschreven. Bij deze netwerken worden uitspraken gedaan over het (verwachte) capaciteitsgebruik, de (verwachte) route van de datapakketjes door het netwerk en de delay die deze pakketjes in het netwerk op zullen lopen. Voor het praktijk deel zijn drie van deze voorbeeldnetwerken vertaald naar een netwerkontwerp. De configuratiefiles van de routers in deze netwerken zijn te vinden in externe bijlage Configuraties en Netwerktopologieën. In deze rapportage staan testen beschreven waarmee gecontroleerd kan worden of de uitspraken kloppen. De testen zijn gegroepeerd per testnetwerk. Bij alle testen wordt beschreven wat het doel van de test is, welke handelingen en/of commando's er ingevoerd moeten worden en wat het verwachte resultaat van de test is. Vervolgens is het gevonden/gemeten resultaat ingevuld en is de vraag of de test overeenkomt met het verwachte resultaat beantwoord.

In hoofdstuk 2 is een algemene toelichtingen gegeven over de wijze waarop de testen uitgevoerd dienen te worden. Hoofdstuk 3 behandelt de testen met betrekking tot Unequal cost load sharing. Hoofdstuk 4 behandelt de testen van het DiffServ Traffic Engineering netwerk. In hoofdstuk 5 worden ten slotte de Recovery en Protection testen behandeld.

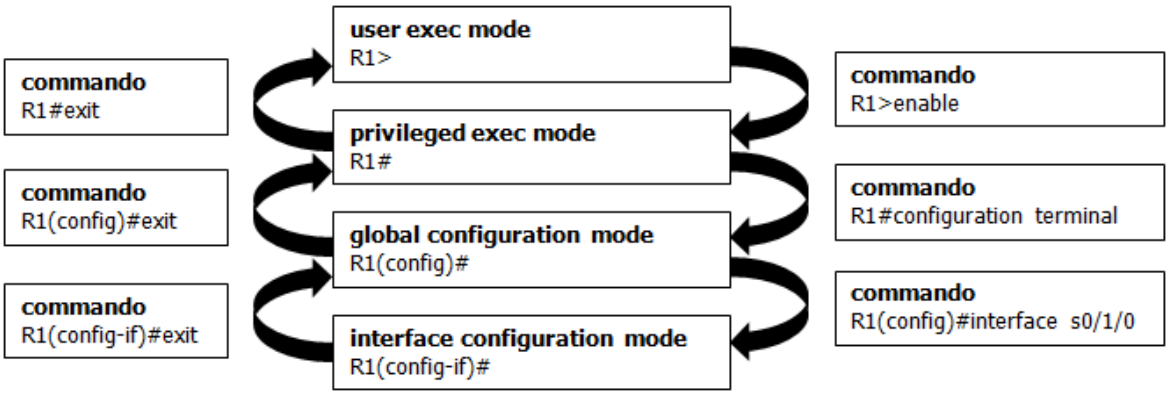
2. Algemene toelichting op de testen

Alle testen gaan uit van een volledig aangesloten en geconfigureerd netwerk. Bij ieder netwerk wordt een netwerktopologie gegeven en wordt aangegeven welk type routers gebruikt dienen te worden. Tevens wordt aangegeven welke configuratiefiles voor de testen gebruikt moeten worden. Om tot een volledig aangesloten en geconfigureerd netwerk te komen dienen onderstaande stappen te worden doorlopen:

1. Pak alle benodigde routers, sluit alle routers aan op de netspanning en zet alle routers aan.
2. Verbind alle routers met de juiste kabels zoals aangegeven in de bij de test aangegeven netwerktopologie. FE0/0 betekent FastEthernet poort 0/0, S0/1/0 betekent Seriële poort 0/1/0. Voor FastEthernet poorten dienen de (gele) crossover kabels gebruikt te worden.
3. Start een PC op en start vervolgens het programma Hyper Terminal.
4. Vul bij name 'Test' in en klik op [Ok], kies bij connect using voor COM1 en klik op [Ok].
5. Kies als eigenschappen: Bits per second: 9600, Data bits: 8, Parity: None, Stop bits: 1, Flow Control: None. Klik op [Ok].
6. Verbind de PC met een router door middel van een Console kabel. Op de PC moet de Console kabel op COM poort 1 worden aangesloten, op de router is hiervoor een speciale 'Console poort' aanwezig.
7. Wacht tot de vraag 'Would you like to enter the initial configuration dialog? [yes/no]:' verschijnt. Type 'no' en druk op Enter. Bij Pagent routers wordt vervolgens nog om de Pagent license key gevraagd, deze is te vinden op de router. Type de code in en druk op Enter.
8. Er verschijnt: `Router>`, type '`enable`' en druk op Enter.
9. Er verschijnt: `Router#`, type '`configuration terminal`' en druk op Enter.
10. Er verschijnt: `Router(config)#`, zoek nu de bij de test aangegeven configuratiefile op in externe bijlage Netwerkconfiguraties, type alle commando's uit de configuratiefile over, druk na ieder commando op Enter, uitroeptekens '!' in de configuratiefiles kunnen worden genegeerd. Als alle commando's ingevoerd zijn, is de configuratie van deze router klaar. Herhaal nu stap 7 t/m 10 totdat alle routers in de netwerktopologie geconfigureerd zijn.

Commando's op een router

De routers hebben verschillende modes waarop commando's gegeven kunnen worden. Figuur 1 geeft deze mode weer voor een router met de naam R1.



Figuur 1. De verschillende router modes en commando's om tussen de modes te wisselen

Vanuit global configuration mode kunnen verschillende modes bereikt worden. Dit voorbeeld gebruikt de interface configuration mode, wat te zien is aan de aanduiding `(config-if)#`. Als bij de testen aangegeven wordt, geef het commando '`R6#show ip route`', dan is dat het commando 'show ip route' op router R6 in priveleged exec mode. Het is dan de bedoeling dat de console kabel met router R6 wordt verbonden, dat middels de commando's in figuur 1 naar de priveleged exec mode wordt gegaan en dat in deze mode het commando 'show ip route' wordt getypt gevolgd door een druk op Enter.

Pagent configuratie

Bij een aantal testen worden commando's gegeven waarmee op de Pagent routers datastromen gegenereerd worden. Een voorbeeld staat hieronder:

Geef het commando: `Pagent#tgn`

Er verschijnt: `Pagent(TGN:OFF<Fa0/0:none)#`

Geef achtereenvolgens onderstaande commando's:

```
fastethernet0/0
add ip
rate 1000
length 1500
l2-dest vul hier het MAC adres van FastEthernet 0/0 van router R1 in.
l3-src 10.0.0.1
l3-dest 6.6.6.6
```

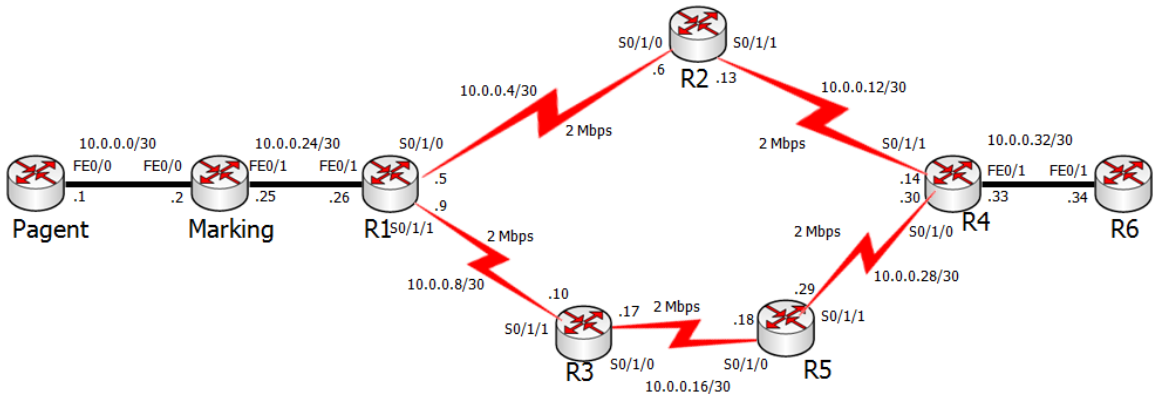
Bij de geel gemarkeerde tekst dient zoals aangegeven het betreffende MAC adres ingegeven te worden. Dit kan achterhaald worden door het commando '`R1#show interface fastethernet 0/0`'. Een voorbeeld van een gedeelte van de output die dan verschijnt wordt hieronder weergegeven, het geel gemarkeerde deel (0018.b992.28d8) is het MAC adres dat in bovenstaande Pagent configuratie gebruikt moet worden.

```
R1# show interfaces fastethernet 0/0
FastEthernet0/0 is up, line protocol is up
Hardware is MV96340 Ethernet, address is 0018.b992.28d8 (bia 0018.b992.28d8)
```

Bij een aantal testen wordt gebruik gemaakt van 'TGN' of 'NQR' voor het genereren van datastromen. Zoals het voorbeeld al aangaf zorgt het commando `Pagent#tgn` er voor dat de TGN configuratie mode verschijnt: `Pagent(TGN:OFF<Fa0/0:none)#`. Deze mode kan weer verlaten worden door het commando '`end`'. Hetzelfde geldt voor NQR.

3. Testnetwerk Unequal cost load sharing

In figuur 2 wordt het netwerktopologie voor Unequal cost load sharing weergegeven (een groter formaat van deze figuur is te vinden in externe bijlage Netwerkconfiguraties). Alle testen met betrekking tot Unequal cost load sharing maken gebruik van deze topologie, de configuratie van de routers kan per test verschillen. Bij elke test wordt aangegeven welke configuratiefiles gebruikt moeten worden. De Pagent router is van het type 2621, alle overige routers zijn van het type 2801.



Figuur 2. Netwerkontwerp voor Unequal cost load sharing

Pagent datastroom voor alle Unequal cost load sharing testen

```
Pagent#tgn
Pagent(TGN:OFF<Fa0/0:none)#
fastethernet0/0
add tcp
rate 1000
length 1500
l2-dest Vul hier MAC adres in van FastEthernet 0/0 van router Marking
l3-src 10.0.0.1
l3-dest 6.6.6.6
l4-dest 20
add fastethernet0/0 1
l4-dest 21
add fastethernet0/0 1
l4-dest 23
add fastethernet0/0 1
l4-dest 25
add fastethernet0/0 1
l4-dest 110
```

Test 1. Bepalen datastromen zonder MPLS Traffic Engineering

Configuratie: Configuraties van de routers in de situatie zonder MPLS Traffic Engineering (H1.2)

Doel van de test: Aantonen hoeveel data in bits/sec. er van en naar routers R1 t/m R5 gaat.

Uit te voeren handelingen:

```
Pagent(TGN:OFF<Fa0/0:5/5)#start
```

Wacht 25 minuten.

```
R1#show interface fastethernet 0/1
R1#show interface serial 0/1/0
R1#show interface serial 0/1/1
R2#show interface serial 0/1/0
R2#show interface serial 0/1/1
R3#show interface serial 0/1/0
R3#show interface serial 0/1/1
R4#show interface fastethernet 0/1
R4#show interface serial 0/1/0
R4#show interface serial 0/1/1
R5#show interface serial 0/1/0
R5#show interface serial 0/1/1
Pagent(TGN:OFF<Fa0/0:5/5)#stop
```

Noteer van elke interface de '5 minute input/output rate in bits/sec', bij verwachte uitkomst is aangegeven of van de betreffende interface de input dan wel output rate genoteerd moet worden.

Verwachte uitkomst:

```
R1#show interface fastethernet 0/1: 5 minute input rate ±4000000 bits/sec
R1#show interface serial 0/1/0: 5 minute output rate ±2000000 bits/sec
R1#show interface serial 0/1/1: 5 minute output rate ±0 bits/sec
R2#show interface serial 0/1/0: 5 minute input rate ±2000000 bits/sec
R2#show interface serial 0/1/1: 5 minute output rate ±2000000 bits/sec
R3#show interface serial 0/1/0: 5 minute output rate ±0 bits/sec
R3#show interface serial 0/1/1: 5 minute input rate ±0 bits/sec
R4#show interface fastethernet 0/1: 5 minute output rate ±2000000 bits/sec
R4#show interface serial 0/1/0: 5 minute input rate ±0 bits/sec
R4#show interface serial 0/1/1: 5 minute input rate ±2000000 bits/sec
R5#show interface serial 0/1/0: 5 minute input rate ±0 bits/sec
R5#show interface serial 0/1/1: 5 minute output rate ±0 bits/sec
```

Toelichting: in de output van het show interface commando wordt, naast een hoop andere gegevens, een 5 minute input rate in bits/sec gegeven en een 5 minute output rate. Hierboven wordt per interface aangegeven of het om de input of output rate gaat. Er staat overal ± voor de bits/sec, reden hiervoor is dat de input en output rate niet heel nauwkeurig zijn.

Gevonden resultaat:

```
R1#show interface fastethernet 0/1: 5 minute input rate 4007000 bits/sec
R1#show interface serial 0/1/0: 5 minute output rate 1966000 bits/sec
R1#show interface serial 0/1/1: 5 minute output rate 0 bits/sec
R2#show interface serial 0/1/0: 5 minute input rate 1965000 bits/sec
R2#show interface serial 0/1/1: 5 minute output rate 1966000 bits/sec
R3#show interface serial 0/1/0: 5 minute output rate 0 bits/sec
R3#show interface serial 0/1/1: 5 minute input rate 0 bits/sec
R4#show interface fastethernet 0/1: 5 minute output rate 1974000 bits/sec
R4#show interface serial 0/1/0: 5 minute input rate 0 bits/sec
R4#show interface serial 0/1/1: 5 minute input rate 1966000 bits/sec
R5#show interface serial 0/1/0: 5 minute input rate 0 bits/sec
```

Test 1. Bepalen datastromen zonder MPLS Traffic Engineering

Vervolg gevonden resultaten Test 1:

```
R5#show interface serial 0/1/1: 5 minute output rate 0 bits/sec
```

Voldoet het resultaat aan de verwachting?

Ja, de resultaten zitten zeer dicht in de buurt van de verwachte uitkomst. De maximale afwijking is 1.75%. Deze afwijking werd gevonden bij R2#show interface serial 0/1/0: 5 minute input rate 1965000 bits/sec. Zoals opgemerkt zijn is de input/output niet heel nauwkeurig. Dat blijkt bijvoorbeeld uit het feit dat er op basis van de resultaten bij router R4 iets meer data via fastethernet 0/1 uitkomt dan er de router inkomt via serial 0/1/1.

Test 2. Bepalen datastromen met MPLS Traffic Engineering

Configuratie: Configuraties van de routers in de situatie met MPLS Traffic Engineering (H1.3)

Doel van de test: Aantonen hoeveel data in bits/sec. er van en naar routers R1 t/m R5 gaat.

Uit te voeren handelingen:

```
Pagent(TGN:OFF<Fa0/0:5/5)#start
```

Wacht 25 minuten.

```
R1#show interface fastethernet 0/1
R1#show interface serial 0/1/0
R1#show interface serial 0/1/1
R2#show interface serial 0/1/0
R2#show interface serial 0/1/1
R3#show interface serial 0/1/0
R3#show interface serial 0/1/1
R4#show interface fastethernet 0/1
R4#show interface serial 0/1/0
R4#show interface serial 0/1/1
R5#show interface serial 0/1/0
R5#show interface serial 0/1/1
Pagent(TGN:OFF<Fa0/0:5/5)#stop
```

Noteer van elke interface de '5 minute input/output rate in bits/sec', bij verwachte uitkomst is aangegeven of van de betreffende interface de input dan wel output rate genoteerd moet worden.

Verwachte uitkomst:

```
R1#show interface fastethernet 0/1: 5 minute input rate ±4000000 bits/sec
R1#show interface serial 0/1/0: 5 minute output rate ±2000000 bits/sec
R1#show interface serial 0/1/1: 5 minute output rate ±2000000 bits/sec
R2#show interface serial 0/1/0: 5 minute input rate ±2000000 bits/sec
R2#show interface serial 0/1/1: 5 minute output rate ±2000000 bits/sec
R3#show interface serial 0/1/0: 5 minute output rate ±2000000 bits/sec
R3#show interface serial 0/1/1: 5 minute input rate ±2000000 bits/sec
R4#show interface fastethernet 0/1: 5 minute output rate ±4000000 bits/sec
R4#show interface serial 0/1/0: 5 minute input rate ±2000000 bits/sec
R4#show interface serial 0/1/1: 5 minute input rate ±2000000 bits/sec
R5#show interface serial 0/1/0: 5 minute input rate ±2000000 bits/sec
R5#show interface serial 0/1/1: 5 minute output rate ±2000000 bits/sec
```

Toelichting: in de output van het show interface commando wordt, naast een hoop andere gegevens, een 5 minute input rate in bits/sec gegeven en een 5 minute output rate. Hierboven wordt per interface aangegeven of het om de input of output rate gaat. Er staat overal ± voor de bits/sec, reden hiervoor is dat de input en output rate niet heel nauwkeurig zijn.

Test 2. Bepalen datastromen met MPLS Traffic Engineering
Vervolg Test 2. **Gevonden resultaat:** R1#show interface fastethernet 0/1: 5 minute input rate 4009000 bits/sec R1#show interface serial 0/1/0: 5 minute output rate 1965000 bits/sec R1#show interface serial 0/1/1: 5 minute output rate 1870000 bits/sec R2#show interface serial 0/1/0: 5 minute input rate 1966000 bits/sec R2#show interface serial 0/1/1: 5 minute output rate 1960000 bits/sec R3#show interface serial 0/1/0: 5 minute output rate 1885000 bits/sec R3#show interface serial 0/1/1: 5 minute input rate 1888000 bits/sec R4#show interface fastethernet 0/1: 5 minute output rate 3888000 bits/sec R4#show interface serial 0/1/0: 5 minute input rate 1890000 bits/sec R4#show interface serial 0/1/1: 5 minute input rate 1959000 bits/sec R5#show interface serial 0/1/0: 5 minute input rate 1909000 bits/sec R5#show interface serial 0/1/1: 5 minute output rate 1905000 bits/sec
Voldoet het resultaat aan de verwachting? Niet helemaal, de datastroom via R1→R2→R4 voldoet aan de verwachting, deze wijkt maximaal 2.0% af van het verwachte resultaat. De datastroom via R1→R3→R5→R4 wijkt echter ca. 5% af, dat is meer verwacht. Een gedeeltelijke verklaring voor de afwijking is gevonden via de `show interface tunnel1` en `show interface tunnel2`. Die laten zien dat er 2149000 bits/sec naar tunnel1 worden gestuurd en 1869000 bits/sec naar tunnel2. Tunnel1 loopt via R1→R2→R4 en tunnel2 via R1→R3→R5→R4. Daarmee is de afwijking verklaart. De vraag blijft hoe het komt dat de 4 Mbps niet precies gelijk worden verdeeld over beide routes. Dit heeft waarschijnlijk te maken met de precieze manier waarop het load sharing plaatsvindt.

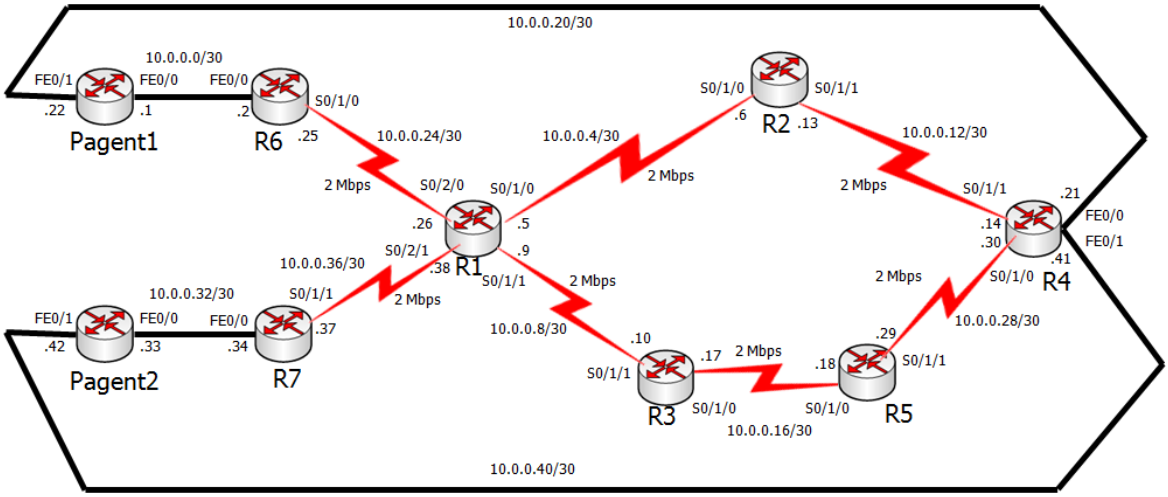
Test 3. Bepalen route van MPLS Traffic Engineering tunnels
Configuratie: Configuraties van de routers in de situatie met MPLS Traffic Engineering (H1.3)
Doel van de test: Aantonen welke route de MPLS Traffic Engineering tunnels gebruiken
Uit te voeren handelingen: `R1#show mpls traffic-eng tunnels`

Verwachte uitkomst:
`Tunnel1: Explicit Route: 10.0.0.6 10.0.0.14 4.4.4.4`
`Tunnel2: Explicit Route: 10.0.0.10 10.0.0.18 10.0.0.30 4.4.4.4`
Toelichting: in de output van het show mpls traffic-eng tunnels commando wordt, naast een hoop andere gegevens, de explicit route gegeven. Dat zijn de ip adressen van de router interfaces tussen begin en eindpunt. Voor tunnel1 zouden dit de ip adressen van interface S0/1/0 van R2, interface S0/1/1 van R4 en het ip adres van de loopback 0 interface van R4 moeten zijn.

Gevonden resultaat: Tunnel1: Explicit Route: 10.0.0.6 10.0.0.14 4.4.4.4 Tunnel2: Explicit Route: 10.0.0.10 10.0.0.18 10.0.0.30 4.4.4.4
Voldoet het resultaat aan de verwachting? Ja, beide tunnels volgen exact de verwachte route.

4. Testen DiffServ Traffic Engineering

In figuur 3 wordt het netwerkontwerp voor DiffServ Traffic Engineering weergegeven (een groter formaat van de figuur is te vinden in externe bijlage Netwerkconfiguraties). Alle testen met betrekking tot DiffServ Traffic Engineering maken gebruik van deze topologie, de configuratie van de routers kan per test verschillen. Bij elke test wordt aangegeven welke configuratiefiles gebruikt moeten worden. Beide Pagent routers zijn van het type 2621, alle overige routers zijn van het type 2801.



Figuur 3. Netwerktopologie DiffServ Traffic Engineering.

Pagent datastromen voor DiffServ Traffic Engineering testen

Er worden voor deze testen verschillende Pagent datastromen gebruikt. De configuraties van de verschillende datastromen voor Pagent1 en Pagent2 worden hierna gegeven. Bij de testen wordt aangegeven welke datastromen gebruikt moeten worden.

Pagent1 1Mbps

```
Pagent1#nqr
Pagent1(NQR:OFF<Fa0/0:none)#
fastethernet0/0
add ip
rate 292
length 300
l2-dest Vul hier MAC adres in van FastEthernet 0/0 van router R6
l3-src 8.8.8.8
l3-dest 10.0.0.22
l3-tos 0xa0
add ip
rate 625
length 60
l2-dest Vul hier MAC adres in van FastEthernet 0/0 van router R6
l3-src 9.9.9.9
l3-dest 10.0.0.22
l3-tos 0x00
fastethernet 0/1 capture
```

Pagent1 1Mbps met variability

```
Pagent1#nqr
Pagent1(NQR:OFF<Fa0/0:none)#
fastethernet0/0
add ip
rate 292
variability 100
length 300
l2-dest Vul hier MAC adres in van FastEthernet 0/0 van router R6
l3-src 8.8.8.8
l3-dest 10.0.0.22
l3-tos 0xa0
add ip
rate 625
variability 100
length 60
l2-dest Vul hier MAC adres in van FastEthernet 0/0 van router R6
l3-src 9.9.9.9
l3-dest 10.0.0.22
l3-tos 0x00
fastethernet 0/1 capture
```

Pagent2 1Mbps

```
Pagent2#nqr
Pagent2(NQR:OFF<Fa0/0:none)#
fastethernet0/0
add ip
rate 292
length 300
l2-dest Vul hier MAC adres in van FastEthernet 0/0 van router R7
l3-src 10.10.10.10
l3-dest 10.0.0.42
l3-tos 0xa0
add ip
rate 625
length 60
l2-dest Vul hier MAC adres in van FastEthernet 0/0 van router R7
l3-src 11.11.11.11
l3-dest 10.0.0.42
l3-tos 0x00
fastethernet 0/1 capture
```

Pagent2 1Mbps met variability

```
Pagent2#nqr
Pagent2(NQR:OFF<Fa0/0:none)#
fastethernet0/0
add ip
rate 292
variability 100
length 300
l2-dest Vul hier MAC adres in van FastEthernet 0/0 van router R7
l3-src 10.10.10.10
l3-dest 10.0.0.42
l3-tos 0xa0
add ip
rate 625
variability 100
length 60
l2-dest Vul hier MAC adres in van FastEthernet 0/0 van router R7
l3-src 11.11.11.11
l3-dest 10.0.0.42
l3-tos 0x00
fastethernet 0/1 capture
```

Pagent2 1Mbps met variabele packetlengte

```
Pagent2#nqr
Pagent2(NQR:OFF<Fa0/0:none)#
fastethernet0/0
add ip
rate 292
length 300
l2-dest Vul hier MAC adres in van FastEthernet 0/0 van router R7
l3-src 10.10.10.10
l3-dest 10.0.0.42
l3-tos 0xa0
add ip
rate 625
length random 40 to 80
l2-dest Vul hier MAC adres in van FastEthernet 0/0 van router R7
l3-src 11.11.11.11
l3-dest 10.0.0.42
l3-tos 0x00
fastethernet 0/1 capture
```

Bij de testen moet regelmatig een andere Pagent datastroom geladen worden. Het kan dan voorkomen dat er nog een oude datastroom in de Pagent NQR aanwezig is. Hieronder wordt aangegeven hoe deze verwijderd kunnen worden:

```
Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#delete traffic-stream 2
Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:1/1)#delete traffic-stream 1
Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:none)#
```

Er dient dus altijd `Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:none)#` te staan voordat er een nieuwe datastroom geconfigureerd wordt.

Test 1. Bepalen delay in situatie zonder MPLS Traffic Engineering
Configuratie: Configuraties van de routers in de situatie zonder MPLS Traffic Engineering (H2.2)
Doel van de test: Bepalen welke delay de pakketjes ondervinden bij verschillende datastromen

Uit te voeren handelingen:
Configureer datastroom: Pagent1 1 Mbps
`Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#start`
Configureer datastroom: Pagent2 1 Mbps
`Pagent2(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#start`
Wacht 20 seconden
`Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#show delay`
Noteer de 'avg-delay' van 'ts# 1 en 2', dit is de gemiddelde delay van traffic stream (ts) nummer 1 en 2 .
Configureer datastroom: Pagent1 1 Mbps met variability
`Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#start`
Configureer datastroom: Pagent2 1 Mbps met variability
`Pagent2(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#start`
Wacht 20 seconden
`Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#show delay`
Noteer de 'avg-delay' van 'ts# 1 en 2', dit is de gemiddelde delay van traffic stream (ts) nummer 1 en 2 .
Configureer datastroom: Pagent1 1 Mbps
`Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#start`
Configureer datastroom: Pagent2 1 Mbps met variabele packetlengte
`Pagent2(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#start`
Wacht 20 seconden
`Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#show delay`
Noteer de 'avg-delay' van 'ts# 1 en 2', dit is de gemiddelde delay van traffic stream (ts) nummer 1 en 2 .

Verwachte uitkomst: **Verwachte delay bij gebruik Pagent1 1Mbps en Pagent2 1Mbps:** Geen specifiekere verwachting dan een delay van enkele milliseconden. **Verwachte delay bij gebruik Pagent1 1Mbps met variability en Pagent2 1Mbps met variability:** Een hogere delay dan bij de vorige meting. **Verwachte delay bij gebruik Pagent1 1Mbps en Pagent2 1Mbps met variabele packetlengte:** Een hogere delay dan bij de eerste meting. Toelichting: de verwachtingen van de eerste meting zijn gebaseerd op enkele vooraf uitgevoerde testen. De datastroom bij de eerste test is constant. Bij de tweede en derde test is de datastroom niet constant. In de tweede test is het moment waarop het pakketje verzonden wordt variabel, de totale datastroom blijft echter wel 1 Mbps. Verwacht wordt dat de delay hierdoor toeneemt, omdat er nu af toe meer data tegelijk bij R2 aankomt dan deze router aankan. Daardoor moet het data overschot tijdelijk gebufferd worden, wat extra delay oplevert. Bij de derde meting wordt een soortgelijk effect verwacht. De pakketgrootte (lengte) van Pagent2 wordt gevarieerd tussen 40 Bytes en 80 Bytes, wat gemiddeld genomen gelijk is aan de 60 Bytes van de datastroom Pagent2 1 Mbps die bij de eerste meting gebruikt wordt. Door de variabele pakketgrootte komt er af en toe meer data bij R2 aan dan deze router aankan. Daardoor moet het data overschot tijdelijk gebufferd worden, wat extra delay oplevert.

Test 1. Bepalen delay in situatie zonder MPLS Traffic Engineering
Vervolg Test 1. **Gevonden resultaat:** **Delay bij gebruik Pagent1 1Mbps en Pagent2 1Mbps:** traffic stream 1: 0.0056 sec traffic stream 2: 0.0049 sec **Delay bij gebruik Pagent1 1Mbps met variability en Pagent2 1Mbps met variability:** traffic stream 1: 0.0084 sec traffic stream 2: 0.0077 sec **Delay bij gebruik Pagent1 1Mbps en Pagent2 1Mbps met variabele packetlengte:** traffic stream 1: 0.0244 sec traffic stream 2: 0.0427 sec
Voldoet het resultaat aan de verwachting? Ja, de eerste meting heeft de laagste delay (beide datastromen ongeveer 5 ms), bij meting 2 neemt de delay bij beide datastromen toe tot ongeveer 8 ms, bij de derde meting neemt de delay nog veel verder toe, namelijk tot 24.4 en 42.7 ms.

Test 2. Bepalen delay in situatie met MPLS Traffic Engineering maar zonder DiffServ Traffic Engineering
Configuratie: Configuraties van de routers in de situatie met MPLS Traffic Engineering maar zonder DiffServ Traffic Engineering (H2.3)
Doel van de test: Bepalen welke delay de pakketjes ondervinden bij verschillende datastromen

Uit te voeren handelingen:
Configureer datastroom: Pagent1 1 Mbps
`Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#start`
Configureer datastroom: Pagent2 1 Mbps
`Pagent2(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#start`
Wacht 20 seconden
`Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#show delay`
Noteer de 'avg-delay' van 'ts# 1 en 2', dit is de gemiddelde delay van traffic stream (ts) nummer 1 en 2 .
Configureer datastroom: Pagent1 1 Mbps met variability
`Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#start`
Configureer datastroom: Pagent2 1 Mbps met variability
`Pagent2(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#start`
Wacht 20 seconden
`Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#show delay`
Noteer de 'avg-delay' van 'ts# 1 en 2', dit is de gemiddelde delay van traffic stream (ts) nummer 1 en 2 .
Configureer datastroom: Pagent1 1 Mbps
`Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#start`
Configureer datastroom: Pagent2 1 Mbps met variabele packetlengte
`Pagent2(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#start`
Wacht 20 seconden
`Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#show delay`
Noteer de 'avg-delay' van 'ts# 1 en 2', dit is de gemiddelde delay van traffic stream (ts) nummer 1 en 2 .

Test 2. Bepalen delay in situatie met MPLS Traffic Engineering maar zonder DiffServ Traffic Engineering
Vervolg Test 2. **Verwachte uitkomst:** **Verwachte delay bij gebruik Pagent1 1Mbps en Pagent2 1Mbps:** Geen specifiekere verwachting dan een delay van enkele milliseconden. **Verwachte delay bij gebruik Pagent1 1Mbps met variability en Pagent2 1Mbps met variability:** Een hogere delay dan bij de vorige meting. **Verwachte delay bij gebruik Pagent1 1Mbps en Pagent2 1Mbps met variabele packetlengte:** Een hogere delay dan bij de eerste meting. Toelichting: de verwachtingen van de eerste meting zijn gebaseerd op enkele vooraf uitgevoerde testen. De datastroom bij de eerste test is constant. Bij de tweede en derde test is de datastroom niet constant. In de tweede test is het moment waarop het pakketje verzonden wordt variabel, de totale datastroom blijft echter wel 1 Mbps. Verwacht wordt dat de delay hierdoor toeneemt, omdat er nu af toe meer data tegelijk bij R2 aankomt dan deze router aankan. Daardoor moet het data overschot tijdelijk gebufferd worden, wat extra delay oplevert. Bij de derde meting wordt een soortgelijk effect verwacht. De pakketgrootte (lengte) van Pagent2 wordt gevarieerd tussen 40 Bytes en 80 Bytes, wat gemiddeld genomen gelijk is aan de 60 Bytes van de datastroom Pagent2 1 Mbps die bij de eerste meting gebruikt wordt. Door de variabele pakketgrootte komt er af en toe meer data bij R2 aan dan deze router aankan. Daardoor moet het data overschot tijdelijk gebufferd worden, wat extra delay oplevert.
Gevonden resultaat: **Delay bij gebruik Pagent1 1Mbps en Pagent2 1Mbps:** traffic stream 1: 0.0055 sec traffic stream 2: 0.0050 sec **Delay bij gebruik Pagent1 1Mbps met variability en Pagent2 1Mbps met variability:** traffic stream 1: 0.0073 sec traffic stream 2: 0.0064 sec **Delay bij gebruik Pagent1 1Mbps en Pagent2 1Mbps met variabele packetlengte:** traffic stream 1: 0.0253 sec traffic stream 2: 0.0440 sec
Voldoet het resultaat aan de verwachting? Ja, de eerste meting heeft de laagste delay (beide datastromen ongeveer 5 ms), bij meting 2 neemt de delay bij beide datastromen toe tot ongeveer 7 ms, bij de derde meting neemt de delay nog veel verder toe, namelijk tot 25.3 en 44.0 ms.

Test 3. Bepalen route van MPLS Traffic Engineering tunnels
Configuratie: Configuraties van de routers in de situatie met MPLS Traffic Engineering maar zonder DiffServ Traffic Engineering (H2.3)
Doel van de test: Aantonen welke route de MPLS Traffic Engineering tunnels gebruiken

Uit te voeren handelingen:
`R6#show mpls traffic-eng tunnels`
`R7#show mpls traffic-eng tunnels`

Test 3. Bepalen route van MPLS Traffic Engineering tunnels
Vervolg Test 3. **Verwachte uitkomst:** R6 Tunnel1: `Explicit Route: 10.0.0.26 10.0.0.6 10.0.0.14 4.4.4.4` R7 Tunnel2: `Explicit Route: 10.0.0.38 10.0.0.6 10.0.0.14 4.4.4.4` Toelichting: in de output van het show mpls traffic-eng tunnels commando wordt, naast een hoop andere gegevens, de explicit route gegeven. Dat zijn de ip adressen van de router interfaces tussen begin en eindpunt. Voor tunnel1 zouden dit de ip adressen van interface S0/2/0 van R1, interface S0/1/0 van R2, interface S0/1/1 van R4 en het ip adres van de loopback 0 interface van R4 moeten zijn. Voor tunnel2 zouden dit de ip adressen van interface S0/2/1 van R1, interface S0/1/0 van R2, interface S0/1/1 van R4 en het ip adres van de loopback 0 interface van R4 moeten zijn.
Gevonden resultaat: R6 Tunnel1: Explicit Route: 10.0.0.26 10.0.0.6 10.0.0.14 4.4.4.4 R7 Tunnel2: Explicit Route: 10.0.0.38 10.0.0.6 10.0.0.14 4.4.4.4
Voldoet het resultaat aan de verwachting? Ja, beide tunnels volgen exact de verwachte route.

Test 4. Bepalen delay in situatie met DiffServ Traffic Engineering
Configuratie: Configuraties van de routers in de situatie met DiffServ Traffic Engineering (H2.4)
Doel van de test: Bepalen welke delay de pakketjes ondervinden bij verschillende datastromen

Uit te voeren handelingen:
Configureer datastroom: Pagent1 1 Mbps
`Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#start`
Configureer datastroom: Pagent2 1 Mbps
`Pagent2(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#start`
Wacht 20 seconden
`Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#show delay`
Noteer de 'avg-delay' van 'ts# 1 en 2', dit is de gemiddelde delay van traffic stream (ts) nummer 1 en 2 .
`Pagent2(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#show delay`
Noteer de 'avg-delay' van 'ts# 1 en 2', dit is de gemiddelde delay van traffic stream (ts) nummer 1 en 2 .
Configureer datastroom: Pagent1 1 Mbps met variability
`Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#start`
Configureer datastroom: Pagent2 1 Mbps met variability
`Pagent2(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#start`
Wacht 20 seconden
`Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#show delay`
Noteer de 'avg-delay' van 'ts# 1 en 2', dit is de gemiddelde delay van traffic stream (ts) nummer 1 en 2 .
`Pagent2(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#show delay`
Noteer de 'avg-delay' van 'ts# 1 en 2', dit is de gemiddelde delay van traffic stream (ts) nummer 1 en 2 .
Configureer datastroom: Pagent1 1 Mbps
`Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#start`
Configureer datastroom: Pagent2 1 Mbps met variabele packetlengte
`Pagent2(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#start`
Wacht 20 seconden
`Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#show delay`
Noteer de 'avg-delay' van 'ts# 1 en 2', dit is de gemiddelde delay van traffic stream (ts) nummer 1 en 2 .
`Pagent2(NQR:OFF,Fa0/0:2/2)#show delay`
Noteer de 'avg-delay' van 'ts# 1 en 2', dit is de gemiddelde delay van traffic stream (ts) nummer 1 en 2 .

Test 4. Bepalen delay in situatie met DiffServ Traffic Engineering
Vervolg Test 4. **Verwachte uitkomst:** **Verwachte delay bij gebruik Pagent1 1Mbps en Pagent2 1Mbps:** Geen specifiekere verwachting dan een delay van enkele milliseconden. **Verwachte delay bij gebruik Pagent1 1Mbps met variability en Pagent2 1Mbps met variability:** Dezelfde delay als bij de vorige meting. **Verwachte delay bij gebruik Pagent1 1Mbps en Pagent2 1Mbps met variabele packetlengte:** Dezelfde delay als bij de eerste meting. Toelichting: de verwachtingen van de eerste meting zijn gebaseerd op enkele vooraf uitgevoerde testen. Omdat de data in het netwerk nu verdeeld wordt over de routes R1→R2→R4 en R1→R3→R5→R4 zouden de datastromen geen extra delay moeten ondervinden als gevolg van de variability en variabele pakketgrootte. Daarom is de verwachting dat de delay bij meting 1, 2 en 3 ongeveer gelijk zal zijn.
Gevonden resultaat: **Delay bij gebruik Pagent1 1Mbps en Pagent2 1Mbps:** Pagent1: traffic stream 1: 0.0045 sec Pagent1: traffic stream 2: 0.0028 sec Pagent2: traffic stream 1: 0.0057 sec Pagent2: traffic stream 2: 0.0043 sec **Delay bij gebruik Pagent1 1Mbps met variability en Pagent2 1Mbps met variability:** Pagent1: traffic stream 1: 0.0043 sec Pagent1: traffic stream 2: 0.0028 sec Pagent2: traffic stream 1: 0.0059 sec Pagent2: traffic stream 2: 0.0044 sec **Delay bij gebruik Pagent1 1Mbps en Pagent2 1Mbps met variabele packetlengte:** Pagent1: traffic stream 1: 0.0043 sec Pagent1: traffic stream 2: 0.0027 sec Pagent2: traffic stream 1: 0.0059 sec Pagent2: traffic stream 2: 0.0043 sec
Voldoet het resultaat aan de verwachting? Ja, bij alle metingen wordt ongeveer dezelfde delay gevonden. De delay van de datastromen van Pagent2 is iets hoger omdat deze via de iets langere route R1→R3→R5→R4 lopen.

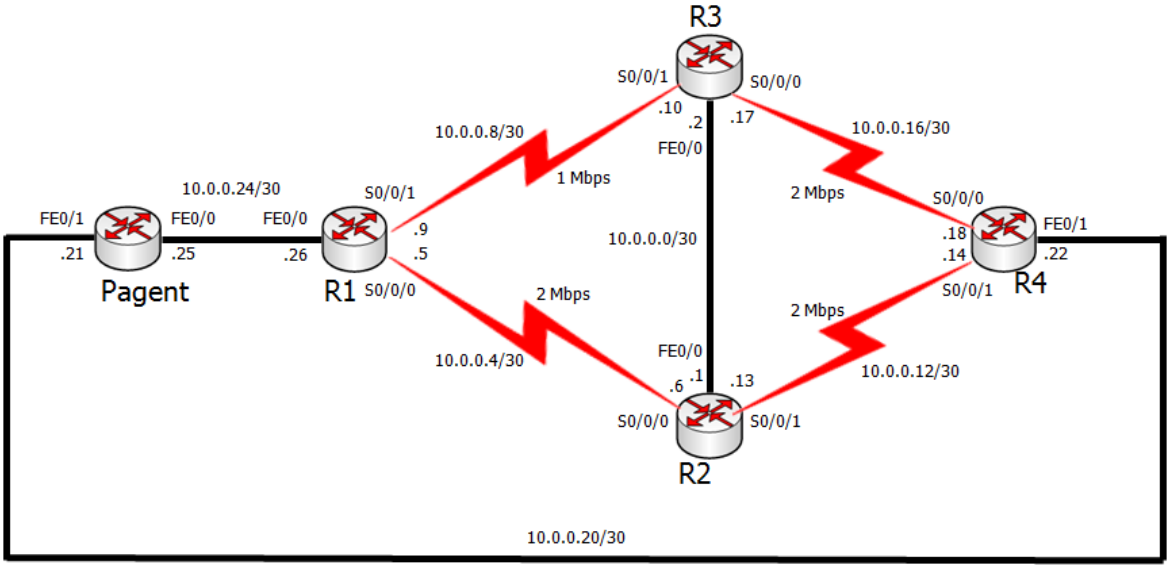
Test 5. Bepalen route van DiffServ Traffic Engineering tunnels
Configuratie: Configuraties van de routers in de situatie met DiffServ Traffic Engineering (H2.4)
Doel van de test: Aantonen welke route de MPLS Traffic Engineering tunnels gebruiken

Uit te voeren handelingen:
`R6#show mpls traffic-eng tunnels`
`R7#show mpls traffic-eng tunnels`

Test 5. Bepalen route van DiffServ Traffic Engineering tunnels
Vervolg Test 5. **Verwachte uitkomst:** R6 Tunnel1: `Explicit Route: 10.0.0.26 10.0.0.6 10.0.0.14 4.4.4.4` R6 Tunnel2: `Explicit Route: 10.0.0.26 10.0.0.6 10.0.0.14 4.4.4.4` R7 Tunnel3: `Explicit Route: 10.0.0.38 10.0.0.6 10.0.0.14 4.4.4.4` R7 Tunnel4: `Explicit Route: 10.0.0.38 10.0.0.10 10.0.0.18 10.0.0.30 4.4.4.4` Toelichting: in de output van het show mpls traffic-eng tunnels commando wordt, naast een hoop andere gegevens, de explicit route gegeven. Dat zijn de ip adressen van de router interfaces tussen begin en eindpunt. Voor tunnel1 en tunnel2 zouden dit de ip adressen van interface S0/2/0 van R1, interface S0/1/0 van R2, interface S0/1/1 van R4 en het ip adres van de loopback 0 interface van R4 moeten zijn. Voor tunnel3 zouden dit de ip adressen van interface S0/2/1 van R1, interface S0/1/0 van R2, interface S0/1/1 van R4 en het ip adres van de loopback 0 interface van R4 moeten zijn. Voor tunnel4 zouden dit de ip adressen van interface S0/2/1 van R1, interface S0/1/1 van R3, interface S0/1/0 van R5, interface S0/1/0 van R4 en het ip adres van de loopback 0 interface van R4 moeten zijn.
Gevonden resultaat: R6 Tunnel1: Explicit Route: 10.0.0.26 10.0.0.6 10.0.0.14 4.4.4.4 R6 Tunnel2: Explicit Route: 10.0.0.26 10.0.0.6 10.0.0.14 4.4.4.4 R7 Tunnel3: Explicit Route: 10.0.0.38 10.0.0.6 10.0.0.14 4.4.4.4 R7 Tunnel4: Explicit Route: 10.0.0.38 10.0.0.10 10.0.0.18 10.0.0.30 4.4.4.4
Voldoet het resultaat aan de verwachting? Ja, alle tunnels volgen exact de verwachte route.

5. MPLS Traffic Engineering Recovery en Protection

In figuur 4 wordt het netwerkontwerp voor MPLS Traffic Engineering Recovery en Protection weergegeven (een groter formaat van deze figuur is te vinden in externe bijlage Netwerkconfiguraties). Alle testen met betrekking tot Recovery en Protection maken gebruik van deze topologie, de configuratie van de routers kan per test verschillen. Bij elke test wordt aangegeven welke configuratiefiles gebruikt moeten worden. De Pagent router is van het type 2621, alle overige routers zijn van het type 2811.



Figuur 4. Netwerktopologie voor MPLS Traffic Engineering Recovery en Protection.

Pagent datastromen voor DiffServ Traffic Engineering testen

```
Pagent#nqr
Pagent(NQR:OFF<Fa0/0:none)#
fastethernet0/0
add ip
send 4000
rate 200
length 300
l2-dest Vul hier MAC adres in van FastEthernet 0/0 van router R1
l3-src 8.8.8.8
l3-dest 10.0.0.21
fastethernet 0/1 capture
```

Test 1. Bepalen hoeveel pakketjes gedropt worden in situatie zonder MPLS Traffic Engineering

Configuratie: Configuraties van de routers in de situatie zonder MPLS Traffic Engineering (H3.2)

Doel van de test: Bepalen hoeveel van de verzonden pakketjes aankomen en hoeveel er gedropt worden. Omdat bekent is hoeveel pakketjes er per seconde verstuurd worden, kan hieruit afgeleid worden hoe lang de beschikbare capaciteit niet gebruikt wordt.

Uit te voeren handelingen:

Configureer de aangegeven Pagent datastroom

```
Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:1/1)#start send
```

Trek na ca. 1 seconde de seriële kabel tussen router R2 en R4 los.

Op de Pagent router verschijnt achtereenvolgens:

```
Pagent1(NQR:SEND,Fa0/0:1/1)#

   Send process complete.

Pagent1(NQR:WAIT,Fa0/0:1/1)#
Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:1/1)#
```

Geef daarna onderstaand commando

```
Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:1/1)#show pkt
```

Noteer de waarden van 'sent' 'recvd' 'dropped' van 'ts# 1', dit zijn respectievelijk het aantal verzonden (sent), ontvangen (recvd) en gedropte (dropped) pakketjes van traffic stream (ts) nummer 1.

Nogmaals dezelfde test maar nu met het lostrekken van een andere seriële kabel.

Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:1/1)#start send

Trek na ca. 1 seconde de seriële kabel tussen router R1 en R2 los.

Op de Pagent router verschijnt achtereenvolgens:

Pagent1(NQR:SEND,Fa0/0:1/1)#

  Send process complete.

Pagent1(NQR:WAIT,Fa0/0:1/1)#
Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:1/1)#

Geef daarna onderstaand commando

Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:1/1)#show pkt

Noteer de waarden van 'sent' 'recvd' 'dropped' van 'ts# 1', dit zijn respectievelijk het aantal verzonden (sent), ontvangen (recvd) en gedropte (dropped) pakketjes van traffic stream (ts) nummer 1.

Herhaal beide testen nog twee keer.

Verwachte uitkomst:

Geen specifieke verwachting, behalve dat de beschikbare capaciteit één tot enkele seconden niet gebruikt zal worden. Omdat er 200 pakketjes per seconde verstuurd worden is de verwachting dat er minimaal 200 pakketjes bij dropped gevonden worden.

Toelichting: na het lostrekken van de kabel dient OSPF een nieuwe route te berekenen tussen R1 en R4, dit kost enige tijd. Hoeveel tijd precies is onbekend, dat zal uit deze test moeten blijken.

Test 1. Bepalen hoeveel pakketjes gedropt worden in situatie zonder MPLS Traffic Engineering
Vervolg Test 1. **Gevonden resultaat:** **Resultaat bij lostrekken seriële kabel tussen R2 en R4:** Test 1: sent 4000, received 2497, dropped 1503 Test 2: sent 4000, received 2497, dropped 1503 Test 3: sent 4000, received 2496, dropped 1504 **Resultaat bij lostrekken seriële kabel tussen R2 en R4:** Test 1: sent 4000, received 2496, dropped 1504 Test 2: sent 4000, received 2496, dropped 1504 Test 3: sent 4000, received 2497, dropped 1503
Voldoet het resultaat aan de verwachting? Ja, al duurt het wel erg lang voordat er weer een nieuwe route gevonden is. Hierdoor wordt de beschikbare capaciteit ca. 7.5 seconden niet gebruikt.

Test 2. Bepalen hoeveel pakketjes gedropt worden in situatie met MPLS Traffic Engineering
Configuratie: Configuraties van de routers in de situatie met MPLS Traffic Engineering (H3.3)
Doel van de test: Bepalen hoeveel van de verzonden pakketjes aankomen en hoeveel er gedropt worden. Omdat bekent is hoeveel pakketjes er per seconde verstuurd worden, kan hieruit afgeleid worden hoe lang de beschikbare capaciteit niet gebruikt wordt.

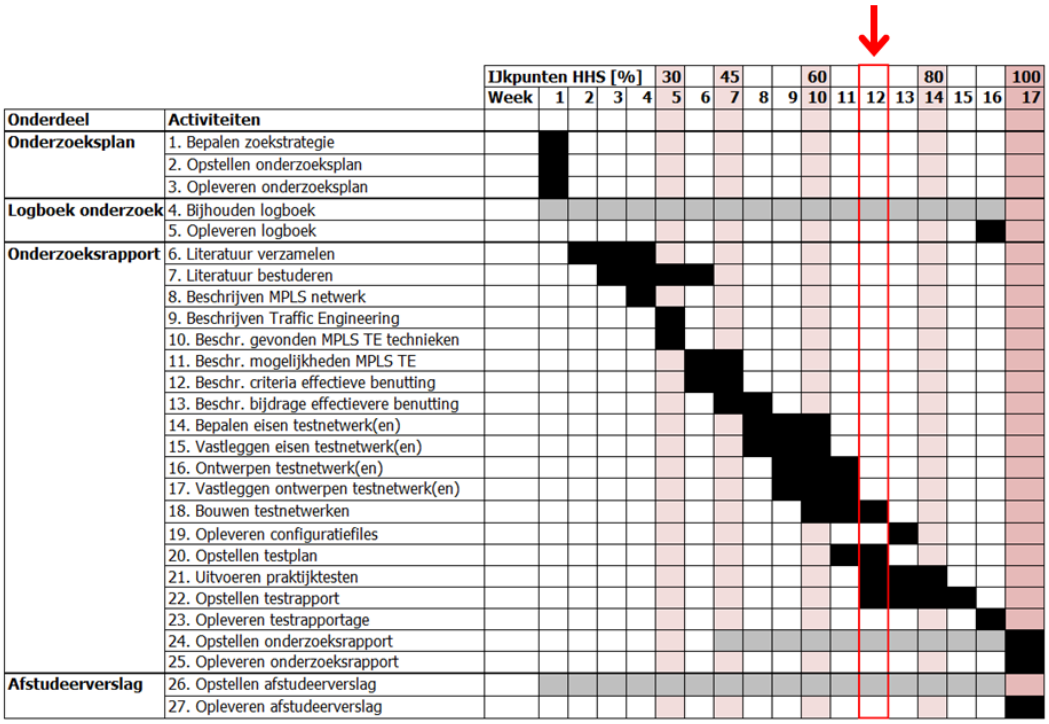
Uit te voeren handelingen:
Configureer de aangegeven Pagent datastroom
`Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:1/1)#start send`
Trek na ca. 1 seconde de seriële kabel tussen router R2 en R4 los.
Op de Pagent router verschijnt achtereenvolgens:
`Pagent1(NQR:SEND,Fa0/0:1/1)#`
 	
`Send process complete.`
 	
`Pagent1(NQR:WAIT,Fa0/0:1/1)#`
`Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:1/1)#`
Geef daarna onderstaand commando
`Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:1/1)#show pkt`
Noteer de waarden van 'sent' 'recvd' 'dropped' van 'ts# 1', dit zijn respectievelijk het aantal verzonden (sent), ontvangen (recvd) en gedropte (dropped) pakketjes van traffic stream (ts) nummer 1.
Maak de seriële kabel tussen R2 en R4 weer vast.
 	
Nogmaals dezelfde test maar nu met het lostrekken van een andere seriële kabel.
Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:1/1)#start send
Trek na ca. 1 seconde de seriële kabel tussen router R1 en R2 los.
Op de Pagent router verschijnt achtereenvolgens:
Pagent1(NQR:SEND,Fa0/0:1/1)#
 	
Send process complete.
 	
Pagent1(NQR:WAIT,Fa0/0:1/1)#
Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:1/1)#
Geef daarna onderstaand commando

Test 2. Bepalen hoeveel pakketjes gedropt worden in situatie met MPLS Traffic Engineering
Vervolg uit te voeren handelingen: Pagent1(NQR:OFF,Fa0/0:1/1)#show pkt Noteer de waarden van 'sent' 'recvd' 'dropped' van 'ts# 1', dit zijn respectievelijk het aantal verzonden (sent), ontvangen (recvd) en gedropte (dropped) pakketjes van traffic stream (ts) nummer 1. Maak de seriële kabel tussen R1 en R2 weer vast. Herhaal beide testen nog twee keer.
Verwachte uitkomst: Volgens de literatuur zou de beschikbare capaciteit ca. 50 milliseconden (ms) niet gebruik worden. Omdat er 200 pakketjes per seconde verstuurd worden is de verwachting dat er hierdoor maximaal ca. 10 pakketjes bij dropped gevonden worden. Toelichting: na het lostrekken van de kabel zou het dataverkeer binnen ca. 50 ms omgeleid moeten worden via de geconfigureerde Link of Node Protection tunnel.
Gevonden resultaat: **Resultaat bij lostrekken seriële kabel tussen R2 en R4:** Test 1: sent 4000, received 3962, dropped 38 Test 2: sent 4000, received 3960, dropped 40 Test 3: sent 4000, received 3961, dropped 39 **Resultaat bij lostrekken seriële kabel tussen R2 en R4:** Test 1: sent 4000, received 3965, dropped 35 Test 2: sent 4000, received 3966, dropped 34 Test 3: sent 4000, received 3961, dropped 39
Voldoet het resultaat aan de verwachting? Nee, de capaciteit wordt 170 tot 200 ms niet gebruikt, dat is weliswaar veel sneller dan zonder Recovery en Protection maar ook ca. 4 keer zo lang als verwacht.

Test 3 staat op de volgende pagina.

Test 3. Bepalen of de Link en Node Protection tunnels inderdaad gebruikt worden
Configuratie: Configuraties van de routers in de situatie met MPLS Traffic Engineering (H3.3)
Doel van de test: In theorie zou de Link Protection tunnel gebruikt moeten worden bij uitval van de verbinding tussen R2 en R4. Ook zou de Node Protection tunnel gebruikt moeten worden bij uitval van de verbinding tussen R1 en R2. Deze test moet uitwijzen of dat ook daadwerkelijk gebeurt.
Uit te voeren handelingen: `R2#show mpls traffic-eng fast-reroute database` Noteer de 'Status' van LSP 1.1.1.1 Trek de seriële kabel tussen router R2 en R4 los. `R2#show mpls traffic-eng fast-reroute database` Noteer de 'Status' van LSP 1.1.1.1 Maak de seriële kabel tussen R2 en R4 weer vast. R1#show mpls traffic-eng fast-reroute database Noteer de 'Status' van Tunnel1 Trek de seriële kabel tussen router R1 en R2 los. R1#show mpls traffic-eng fast-reroute database Noteer de 'Status' van Tunnel1 Maak de seriële kabel tussen R1 en R2 weer vast. Toelichting: in de output van 'show mpls traffic-eng fast-reroute database' wordt in de meest rechter kolom de status weergegeven, hier staat als het goed is 'ready' of 'active'.
Verwachte uitkomst: Verwachte status voor lostrekken kabel tussen R2 en R4: ready Verwachte status na lostrekken kabel tussen R2 en R4: active Verwachte status voor lostrekken kabel tussen R1 en R2: ready Verwachte status na lostrekken kabel tussen R1 en R2: active Toelichting: na het lostrekken van de kabel zou het dataverkeer binnen ca. 50 ms omgeleid moeten worden via de geconfigureerde Link of Node Protection tunnel. De status van de Link of de Node Protection tunnel zou op dat moment moeten veranderen naar 'active'.
Gevonden resultaat: Status voor lostrekken kabel tussen R2 en R4: ready Status na lostrekken kabel tussen R2 en R4: active Status voor lostrekken kabel tussen R1 en R2: ready Status na lostrekken kabel tussen R1 en R2: active
Voldoet het resultaat aan de verwachting? Ja, de status verandert inderdaad van ready in active direct na het lostrekken van de kabel.

Stand van zaken van het onderzoek: Hoe kunnen Traffic Engineering technieken worden ingezet voor het effectiever benutten van een MPLS netwerk met standaard routering?



Versie: 1.00

Auteur:Sebastiaan van de Grint (studentnummer 4401)

Opdrachtgever: Richard Schmidt
Blok: TI-dt G3 Afstuderen

Den Haag, 29 maart 2010

Inhoudsopgave Pagina

1. Inleiding

Dit document geeft op een kort en bondige manier de voortgang van het onderzoek weer. De afstudeerder wordt door het bijhouden van dit document gedwongen wekelijks even naar de stand van zaken te kijken. Voor de begeleiders is dit document een snelle manier om te zien of het onderzoek nog volgens schema verloopt. Aan het einde van elke week kijkt de afstudeerder welke activiteiten er die week uitgevoerd zijn. Ook wordt bekeken of het onderzoek nog op schema ligt en welke activiteiten er volgende week uitgevoerd dienen te worden.

2. Week 1

Uitgevoerde activiteiten	- bepalen zoekstrategie - opstellen onderzoeksplan - opleveren onderzoeksplan
Onderzoek op schema?	**JA**
Activiteiten volgende week	- literatuur verzamelen
Afwijkingen van onderzoeksplan	Nee

3. Week 2

Uitgevoerde activiteiten	- literatuur verzamelen (boeken) - onderzoeksplan bespreken met bedrijfsbegeleider
Onderzoek op schema?	**JA**
Activiteiten volgende week	- literatuur bestuderen
Afwijkingen van onderzoeksplan	Ja, in week 3 wordt niet gezocht naar literatuur. Reden: doelstellingen gezochte literatuur in boekvorm bereikt. In week 4 nog verder zoeken naar artikelen.

4. Week 3

Uitgevoerde activiteiten	- literatuur bestuderen - onderzoeksplan definitief gemaakt
Onderzoek op schema?	**JA**
Activiteiten volgende week	- literatuur bestuderen - literatuur zoeken (artikelen)
Afwijkingen van onderzoeksplan	Nee

5. Week 4

Uitgevoerde activiteiten	- literatuur zoeken (artikelen) - literatuur bestuderen - beschrijven MPLS netwerk
Onderzoek op schema?	**JA**
Activiteiten volgende week	- literatuur bestuderen - beschrijven Traffic Engineering - beschrijven gevonden MPLS TE technieken
Afwijkingen van onderzoeksplan	Nee

6. Week 5

Uitgevoerde activiteiten	- literatuur bestuderen - beschrijven Traffic Engineering - beschrijven gevonden MPLS TE technieken
Onderzoek op schema?	**JA**
Activiteiten volgende week	- beschrijven mogelijkheden gevonden MPLS Traffic Engineering technieken - beschrijven criteria effectieve benutting van een MPLS netwerk - literatuur bestuderen
Afwijkingen van onderzoeksplan	Nee

7. Week 6

Uitgevoerde activiteiten	- beschrijven mogelijkheden gevonden MPLS Traffic Engineering technieken - beschrijven criteria effectieve benutting van een MPLS netwerk; - literatuur bestuderen
Onderzoek op schema?	**JA**
Activiteiten volgende week	- beschrijven mogelijkheden gevonden MPLS Traffic Engineering technieken - beschrijven criteria effectieve benutting van een MPLS netwerk - beschrijven bijdrage MPLS Traffic Engineering technieken aan effectievere benutting netwerk
Afwijkingen van onderzoeksplan	Nee

8. Week 7

Uitgevoerde activiteiten	- beschrijven mogelijkheden gevonden MPLS Traffic Engineering technieken - beschrijven criteria effectieve benutting van een MPLS netwerk
Onderzoek op schema?	**Nee**, niet toegekomen aan beschrijven bijdrage MPLS Traffic Engineering technieken aan effectievere benutting. **Reden:** beschrijven mogelijkheden gevonden technieken kostte meer tijd dan gedacht. **Oplossing**: geen heel grote achterstand, voor de zekerheid volgende week wat extra tijd gereserveerd om weer op schema te komen.
Activiteiten volgende week	- beschrijven bijdrage MPLS Traffic Engineering technieken aan effectievere benutting netwerk - bepalen eisen testnetwerken - vastleggen eisen testnetwerken
Afwijkingen van onderzoeksplan	Kleine afwijking in planning, zie toelichting onderzoek op schema.

9. Week 8

Uitgevoerde activiteiten	- beschrijven bijdrage MPLS Traffic Engineering technieken aan effectievere benutting netwerk - bepalen eisen testnetwerken - vastleggen eisen testnetwerken
Onderzoek op schema?	**JA**
Activiteiten volgende week	- bepalen eisen testnetwerken - vastleggen eisen testnetwerken - ontwerpen testnetwerken - vastleggen ontwerpen testnetwerken - tussenverslag 60% opleveren
Afwijkingen van onderzoeksplan	Nee

10. Week 9

Uitgevoerde activiteiten	- bepalen eisen testnetwerken - vastleggen eisen testnetwerken - tussenverslag 60% opleveren
Onderzoek op schema?	**JA**
Activiteiten volgende week	- bepalen eisen testnetwerken - vastleggen eisen testnetwerken - ontwerpen testnetwerken - vastleggen ontwerpen testnetwerken - tussenverslag 60% bespreken
Afwijkingen van onderzoeksplan	Kleine afwijking, ik heb me deze week vooral bezig gehouden met het bepalen en vastleggen van de eisen en nog niet met de vertaling ervan in een ontwerp. Dit kwam onder andere door het opleveren van het procesverslag. Qua hoeveelheid verrichte werkzaamheden zit ik nog wel op schema.

11. Week 10

Uitgevoerde activiteiten	- bepalen eisen testnetwerken - vastleggen eisen testnetwerken - ontwerpen testnetwerken - vastleggen ontwerpen testnetwerken - tussenverslag 60% bespreken
Onderzoek op schema?	**JA**
Activiteiten volgende week	- ontwerpen testnetwerken - vastleggen ontwerpen testnetwerken - bouwen testnetwerken - opstellen testplan
Afwijkingen van onderzoeksplan	Kleine afwijking, ik heb me deze week vooral bezig gehouden met het bepalen en vastleggen van de eisen en met het ontwerpen van de testnetwerken. Hierdoor ben ik nog niet aan het bouwen van de testnetwerken toegekomen. Qua hoeveelheid verrichte werkzaamheden zit ik nog wel op schema.

12. Week 11

Uitgevoerde activiteiten	- ontwerpen testnetwerken - vastleggen ontwerpen testnetwerken - bouwen testnetwerken - opstellen testplan
Onderzoek op schema?	**JA**
Activiteiten volgende week	- bouwen testnetwerken - opstellen testplan - uitvoeren praktijktesten - opstellen testrapportage
Afwijkingen van onderzoeksplan	Nee

13. Week 12

Uitgevoerde activiteiten	- bouwen testnetwerken - opstellen testplan - uitvoeren praktijktesten - opstellen testrapportage
Onderzoek op schema?	**JA**
Activiteiten volgende week	- bouwen testnetwerken - uitvoeren praktijktesten - opstellen testrapportage
Afwijkingen van onderzoeksplan	Nee

14. Week 13

Uitgevoerde activiteiten	- bouwen testnetwerken - uitvoeren praktijktesten - opstellen testrapportage
Onderzoek op schema?	**JA**
Activiteiten volgende week	- opstellen verslag 80% tussentijds assessment
Afwijkingen van onderzoeksplan	**Ja**, ik had volgende week nog aan de praktijktesten willen werken om deze te optimaliseren, dat gaat niet lukken omdat ik volgende week volledig nodig heb om aan het procesverslag voor het tussentijds assessment te werken. **Reden:** problemen met de Pagent apparatuur en een verouderde router image leverden vertraging op. Hierdoor heb ik in week 12 en 13 weinig tijd aan het procesverslag kunnen besteden. **Oplossing**: omwille van de tijd vervalt de optimalisatie van de praktijktesten.

15. Week 14

Uitgevoerde activiteiten	- opstellen verslag 80% tussentijds assessment
Onderzoek op schema?	**JA**
Activiteiten volgende week	- opstellen verslag 80% tussentijds assessment - opleveren verslag 80% tussentijds assessment
Afwijkingen van onderzoeksplan	Zie toelichting vorige week

16. Week 15

Uitgevoerde activiteiten	- opstellen verslag 80% tussentijds assessment - opleveren verslag 80% tussentijds assessment
Onderzoek op schema?	**JA**
Activiteiten volgende week	- opstellen testrapportage - opleveren configuratiefiles - 80% tussentijds assessment
Afwijkingen van onderzoeksplan	Beetje geschoven met de verschillende rapportage werkzaamheden vanwege het tussentijds assessment.

17. Week 16

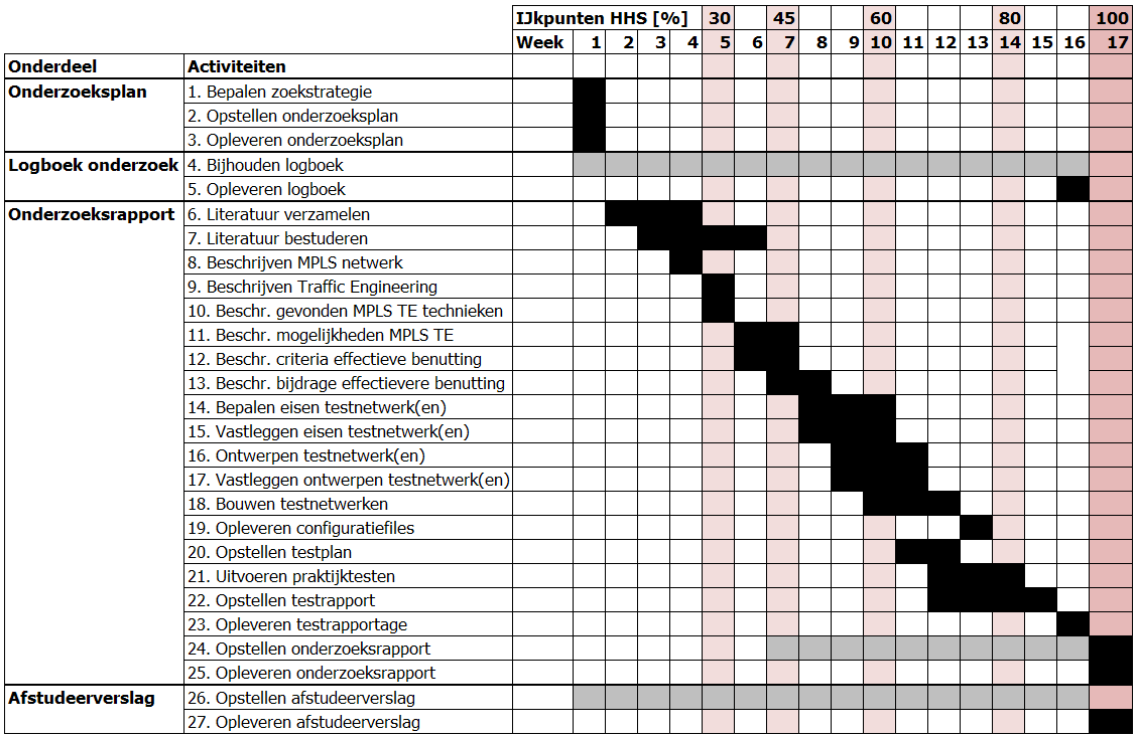
Uitgevoerde activiteiten	- opstellen testrapportage - opleveren testrapportage - opleveren configuratiefiles - 80% tussentijds assessment - opstellen onderzoeksrapport
Onderzoek op schema?	**JA**
Activiteiten volgende week	- opleveren onderzoeksrapport - opleveren afstudeerverslag
Afwijkingen van onderzoeksplan	Nee

18. Week 17

Uitgevoerde activiteiten	- opleveren onderzoeksrapport - opstellen afstudeerverslag - opleveren afstudeerverslag
Onderzoek op schema?	**JA**
Activiteiten volgende week	- inleveren afstudeerdossier
Afwijkingen van onderzoeksplan	Nee

19. Activiteitenplanning

Het onderzoek duurt 17 weken. Figuur 1 geeft de activiteiten schematisch weer.



Figuur 1. Schema tijdsplanning activiteiten

Bij de inschatting van de tijdsbesteding voor de activiteiten van figuur 1 is rekening gehouden met enige uitloop ten gevolge van tegenslagen. Omdat de uitloop al is verdisconteerd in de losse onderdelen is er aan het einde van het project geen extra uitloop opgenomen.