

FACULTEIT INGENIEURSWETENSCHAPPEN
DEPARTEMENT BURGERLIJKE BOUWKUNDE
AFDELING VERKEER EN INFRASTRUCTUUR
KASTEELPARK ARENBERG 40
B-3001 HEVERLEE



KATHOLIEKE
UNIVERSITEIT
LEUVEN

Robuustheid van verkeersnetwerken bij rampen en evacuaties

Stijn WILLEMS

E2005
Promotor: Prof. ir. L.H. IMMERS
Assessoren: ir. arch. A. BLEUKX
dr. ir. C. TAMPERE

Eindwerk voorgedragen tot
het behalen van de graad van
Burgerlijk Bouwkundig Ingenieur

Toelating tot bruikleen

De auteur geeft de toelating deze eindverhandeling voor consultatie beschikbaar te stellen en delen ervan te kopiëren voor eigen gebruik. Elk ander gebruik valt onder de strikte beperkingen van het auteursrecht; in het bijzonder wordt er gewezen op de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze eindverhandeling.

Leuven, mei 2005

*I have no special talents.
I am only passionately curious.*
(A.E)

Woord vooraf

Voor u ligt mijn eindwerk. Ik kan dit eindwerk niet beter omschrijven dan met de spreekwoordelijke “kers op de taart”.

Even verduidelijken. De taart, die stelt mijn vijf jaar durende opleiding tot Burgerlijk Bouwkundig Ingenieur voor. Die vijf voorbije jaren waren een enorme verrijking voor mezelf. Ik zou dan ook mijn ouders oprecht willen bedanken voor deze unieke kans en voor de niet aflatende mentale, financiële en logistieke steun.

Rest ons nog die kers: mijn eindwerk. Het maken van dit eindwerk was in heel wat opzichten een unieke ervaring. Grote dank gaat uit naar mijn begeleiders Art en Chris. Hoe aanstekelijk hun enthousiasme werkt, valt niet in een paar woorden te beschrijven. Ik wens de hele ploeg van de afdeling Verkeer en Infrastructuur te bedanken voor de begeleiding en voor het versnellen van de ontwikkeling van het *Link Transmission Model*, waarvan ik nog de vruchten heb kunnen plukken. Prof. Immers dank ik voor het aanreiken van dit thesisonderwerp en voor het in goede banen sturen van het onderzoek.

Stijn Willems
Leuven, mei 2005

Samenvatting

Antwerpen, maart 2004: ten gevolge van het kantelen van een met broom geladen tankwagen dient één autosnelweg te worden afgesloten en moeten 3 000 personen geëvacueerd worden, met als gevolg een enorme verkeerschaos. De vraag stelt zich wat er zou gebeurd zijn indien geen 3 000 maar 300 000 personen moesten geëvacueerd worden.

In deze thesis wordt ingegaan op het aspect van de verkeersafwikkeling bij rampen en de bijhorende grootschalige evacuaties. Er wordt gezocht naar een antwoord op de vraag: “Is het bestaande verkeersnetwerk robuust genoeg of leidt een extreem grote verkeersvraag sowieso tot algehele chaos en stilstand op de wegen?” Of is er daarentegen door goed management al veel op te lossen en welke maatregelen kan men dan best treffen?

In het eerste deel van deze thesis wordt daartoe de state-of-the-practice in België, de Verenigde Staten en Nederland beschreven. Telkens wordt aangegeven waar zich het aspect van het verkeersmanagement bevindt binnen de rampbestrijdingsorganisatie en de rampenplanning en worden bestaande specifieke verkeersregelplannen en maatregelen besproken.

In België zijn concrete verkeersregelplannen voor rampen eerder uitzonderlijk. Meestal rekent men op de terreinkennis van het personeel en steunt men bij het ter plaatse improviseren van een verkeersregelplan op een aantal gekende basisprincipes. Op grootschalige evacuaties is men helemaal niet voorbereid.

In de Verenigde Staten daarentegen hecht men veel belang aan het degelijk plannen van het verkeersluik van grootschalige evacuaties. Een hele set van evacuatieplannen, maatregelen (bv. *contraflow*) en hulpmiddelen (bv. *Intelligent Transportation Systems*) staat gebruiksklaar.

Ook in Nederland beschikt men over een aantal concrete evacuatieplannen. Sinds de overstromingen van '95 is men meer en meer belang gaan hechten aan het ontwikkelen van zulke plannen. In het algemeen gaat men in vergelijking met België veel verder in het uitwerken van de verkeersregelplannen binnen de rampbestrijdingsplannen.

Het tweede gedeelte van deze thesis spitst zich toe op het modelleren van het verkeer bij evacuaties. Verkeersmodellen zijn ideale hulpmiddelen om de robuustheid van een verkeersnetwerk te onderzoeken, om het effect van een nieuwe maatregel te testen of om evacuatieplannen te optimaliseren.

Eerst wordt aangegeven welke verschillen er te noteren vallen met verkeersmodellering in “normale” omstandigheden, waarna een overzicht wordt gegeven van mogelijke manieren waarop een evacuatiemodel opgebouwd kan worden.

Vervolgens wordt een eigen concrete uitwerking van een evacuatiemodel voorgesteld en toegepast in een case study “optimalisatie van contraflow”. Voor een specifiek scenario wordt een methodologie ter bepaling van de optimale combinatie van links waarop contraflow wordt toegepast, voorgesteld en uitgewerkt. Cruciaal hierbij is het inschakelen van het *Link Transmission Model* als verkeersstroommodel. In een eventueel vervolgonderzoek kan het voorgestelde evacuatiemodel verder op punt gesteld worden en ingezet worden om de robuustheid van een verkeersnetwerk bij rampen en evacuaties verder te onderzoeken.

Als algemeen besluit kan gesteld worden dat België op het gebied van het op voorhand plannen van verkeersmanagement bij rampen en evacuaties sterk achterop hinkt in vergelijking met Nederland en de Verenigde Staten. Naast het feit dat in België de kans op (natuur)rampen die een grootschalige evacuatie vereisen kleiner ingeschat wordt, is een mogelijke verklaring hiervoor het niet recent te zijn opgeschrikt door dergelijke ramp.

Uit de studie van de huidige praktijk in de Verenigde Staten, blijken er toch heel wat maatregelen, zoals bv. contraflow, te bestaan die de robuustheid van het verkeersnetwerk kunnen verhogen. Belangrijk bij dit alles is het ontwikkelen van gedetailleerde en wel doordachte evacuatieplannen. Zoals werd aangetoond met de case study kan het gebruik van een evacuatiemodel een grote hulp betekenen voor het ontwikkelen en optimaliseren van dergelijke plannen.

Summary

Antwerp, march 2004: a truck with toxic goods crashes in the harbor. One highway has to be closed and 3 000 people have to be evacuated. As a result, the traffic chaos in the entire Antwerp region is enormous. One can ask what would have happened if 300 000 instead of 3 000 people had to be evacuated.

This Master's thesis focusses on the aspect of the traffic management in case of disasters and mass evacuations. The aim is to find the answer to the question: "Is the robustness of the existing traffic network enough to handle such unusual situations?" Or is it possible to solve most of the problems by proper management? And which measures are most suitable then?

In the first part of this Master's thesis, the state-of-the-practice in Belgium, the United States and the Netherlands is described. For each country, the aspect of the traffic management during disasters and evacuations is situated in the frame of the emergency management organizations and emergency management plans.

In Belgium, specific traffic management plans for disasters are rather exceptional. The emergency management officials count on the knowledge of the terrain of the personnel and traffic plans are improvised after the disaster has occurred.

In contrast with Belgium, the planning of the traffic in case of mass evacuations is given great attention. A lot of evacuation plans and measures (for instance contraflow) were implemented. Intelligent Transportation Systems are also of great support.

In the Netherlands, some concrete evacuation plans are developed. Since the severe floods of 1995, the importance given to the development of such plans kept on growing. In general, the traffic management plans in the emergency plans are much more specific than they are in Belgium.

The second part of this Master's thesis concentrates on evacuation traffic modeling. Traffic models are great helps to the research of the robustness of a traffic network, to test the effect of a new measure or to optimize evacuation plans.

First, the differences in traffic modeling between evacuations and 'normal' situations are discussed. Then an overview of all the possibilities to build an evacuation model is given.

An own evacuation model is proposed and used in a case study "optimization of contraflow".

For a specific scenario, the optimum distribution of the whole network capacity is determined in order to decide which links should be reversed. The *Link Transmission Model* served as traffic flow model.

In further research, the proposed evacuation model can be detailed and used for research on the robustness of a traffic network in case of disasters and evacuations.

As a general conclusion, there can be stated that, concerning the planning of traffic management in case of disasters and evacuations, Belgium is far behind on the Netherlands and the United States. A possible explication is, besides the fact that in Belgium the chance on large-scale evacuations is estimated lower, that such a catastrophe hasn't occurred in Belgium recently.

The study of the state-of-the-practice in the United States shows that numerous measures, for instance contraflow, are able to enhance the robustness of the traffic network in such circumstances. With respect to these possible measures, the development of detailed evacuation plans is very important. As showed with the case study, the use of an evacuation model can be of great support to the development and the optimization of such plans.

Résumé

Anvers, mars 2004: suite au renversement d'un camion-citerne chargé de brome, il a fallu fermer une autoroute et évacuer 3 000 personnes, ce qui a entraîné un énorme chaos au niveau de la circulation. La question qui se pose est la suivante: que se serait-il passé si ce n'était pas 3 000 mais 300 000 personnes qu'il aurait fallu évacuer?

Ce mémoire aborde l'aspect de l'écoulement du trafic routier lors de catastrophes et des évacuations de grande échelle qui y sont liées. L'objectif est de rechercher une réponse à la question suivante: "Le réseau routier existant est-il assez robuste ou la demande très importante de circulation mène-t-elle de toute façon au chaos total et à l'immobilisation sur les routes?" Ou, est-il possible de résoudre pas mal de problèmes grâce à une bonne gestion et quelles sont les meilleures mesures que l'on puisse prendre?

Dans la première partie de ce mémoire sont décrits les états des lieux en Belgique, aux Etats-Unis et aux Pays-Bas. Pour chacun d'entre eux, est indiqué le niveau auquel se trouve l'aspect de la gestion du trafic dans l'organisation des secours et dans la planification des catastrophes. Il y est aussi question des plans et mesures spécifiques de gestion du trafic.

En Belgique, les plans concrets de gestion du trafic en cas de catastrophes sont plutôt exceptionnels. Le plus souvent, on compte sur la connaissance du terrain par le personnel et on s'appuie sur l'improvisation sur place d'un plan spécifique de gestion du trafic suivant un certain nombre de principes de base connus. Nous ne sommes pas du tout préparés aux évacuations à grande échelle.

Aux Etats-Unis par contre, on porte un grand intérêt à une vraie planification du volet de la circulation lors d'évacuations de grande échelle. Un éventail complet de plans d'évacuation, de mesures (par exemple le "contraflow") et d'outils (par exemple les "Intelligent Transportation Systems") est prêt à l'emploi.

Aux Pays-Bas, on dispose aussi de plusieurs plans concrets d'évacuation. Depuis les inondations de 1995, on accorde de plus en plus d'intérêt au développement de tels plans. En général, par rapport à la Belgique, on va beaucoup plus loin dans le développement des plans de gestion du trafic au sein des plans de lutte contre les catastrophes.

La deuxième partie de ce mémoire se concentre sur la modélisation du trafic lors d'évacuations. Les modèles de trafic sont des moyens d'aide idéaux pour examiner la robustesse d'un réseau routier, pour tester l'effet d'une nouvelle mesure ou pour optimiser des plans d'évacuation.

On passe d'abord en revue les différences qu'apportent les modèles de trafic lors de circonstances "normales", l'on donne ensuite des différentes manières possibles d'élaborer un modèle d'évacuation.

Ensuite, le développement concret d'un modèle d'évacuation est exposé et appliqué à une étude de cas "optimisation du contraflow". Dans le cadre d'une recherche secondaire éventuelle, le modèle proposé peut être mis au point et utilisé pour poursuivre les recherches sur la robustesse d'un réseau routier lors des catastrophes et des évacuations.

Sur un plan général, on peut conclure que, dans le domaine de l'élaboration préalable de plans de gestion du trafic en cas de catastrophes et d'évacuations, la Belgique est sérieusement à la traîne par rapport aux Pays-Bas et aux Etats-Unis. Une explication possible est qu'en Belgique, outre le fait qu'on estime que les probabilités de connaître des catastrophes qui requièrent une évacuation de grande échelle sont plus réduites, aucune catastrophe pareille ne s'est produite récemment. De l'étude de la pratique actuelle aux Etats-Unis, il ressort que beaucoup de mesures existent, comme par exemple le contraflow, susceptibles d'augmenter la robustesse des réseaux routiers. Il est donc important de développer des plans d'évacuations détaillés. Comme le montre l'étude de cas, l'utilisation d'un modèle d'évacuation peut constituer une grande aide pour le développement et l'optimisation de ces plans.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	iv
Samenvatting	v
Summary	vii
Résumé	ix
Inhoudsopgave	xi
Lijst van figuren	xiv
Lijst van tabellen	xvi
1 Inleiding	1
1.1 Aanleiding	1
1.2 Probleemstelling	2
1.3 Doel en opbouw van de thesis	3
1.4 Begripsomschrijving	6
1.4.1 Robuustheid van een verkeersnetwerk	6
1.4.2 Ramp	6
1.4.3 Veiligheidsketen	7
1.4.4 Evacuatie	9
2 Verkeersmanagement bij rampen: België	14
2.1 Rampenmanagement en rampenplanning	14
2.1.1 Rampenplanning	15
2.1.2 Rampenbestrijding	17
2.2 Verkeersregeling bij rampen	18
2.2.1 Werkwijze	18
2.2.2 Verkeersregeling binnen de rampenplannen	19
2.2.3 Huidige praktijk	20

2.2.4	Bestaande verkeersregelplannen	23
2.3	Besluit	27
3	Verkeersmanagement bij evacuaties: USA	29
3.1	Inleiding	29
3.2	Algemene zaken	30
3.2.1	Beleid en rampen- en evacuatieplannen	30
3.2.2	Commandostructuur	31
3.2.3	Wanneer evacuatie bevelen?	31
3.2.4	Evacuatietypes	32
3.2.5	Informatieverspreiding naar de bevolking toe	32
3.3	Verkeersgerelateerde zaken	33
3.3.1	Contraflow	33
3.3.2	Intelligent Transportation Systems	38
3.3.3	Belemmering t.g.v. wegenwerken	43
3.3.4	Inzet van openbaar vervoer	44
3.3.5	Andere verkeersmanagementsmaatregelen	44
3.4	Opmerking	45
3.5	Besluit	46
4	Verkeersmanagement bij rampen: Nederland	47
4.1	Rampenbeheersing	47
4.1.1	Deelnemende partijen en verantwoordelijkheden	48
4.1.2	Rampenplanning	49
4.1.3	Rampenbestrijding	51
4.1.4	Vergelijking met België	53
4.2	Verkeer en rampen	54
4.2.1	Werkwijze	54
4.2.2	Bestaande plannen	54
4.2.3	Gehechte belang aan ontwikkelen evacuatieplannen	56
4.2.4	Vergelijking met België	59
4.3	Besluit	60
5	Modelleren van evacuaties	62
5.1	Belang en nut van modelleren	62
5.2	Kader	63
5.3	Modelleren van verkeer voor “gewone” situaties en voor evacuaties: vergelijking	65
5.3.1	Het traditionele verkeersmodel	65
5.3.2	Verkeersmodellen voor evacuaties	66
5.4	Uitwerking submodellen	68

5.4.1	Ritgeneratie	68
5.4.2	Vertrektijdstip	72
5.4.3	Bestemmingskeuze	76
5.4.4	Vervoerwijzekeuze	77
5.4.5	Routekeuze	77
5.5	Bestaande evacuatiemodellen en -pakketten	78
5.6	Besluit	79
6	Case study: optimalisatie van contraflow	80
6.1	Inleiding	80
6.2	Uitwerking algemeen kader	81
6.2.1	Preprocessing	81
6.2.2	Evacuatiemodel	84
6.2.3	Postprocessing	88
6.3	Resultaten LTM	88
6.3.1	Alternatief 0: geen contraflow	89
6.3.2	Alternatieven 1 t.e.m. 17: mogelijke contraflowplannen	91
6.4	Postprocessing	92
6.4.1	Beoordelingsparameters	92
6.4.2	Classificatie van de alternatieven	93
6.5	Opmerking	97
6.6	Besluit	97
7	Besluit	99
A	Broomincident 4 maart 2004	102
A.1	Broom	102
A.2	Verloop van de ramp en de interventies	103
A.3	Lessons learned	106
B	Bestaande evacuatiemodellen en -pakketten	108
B.1	NETSIM	108
B.2	NETVAC	108
B.3	DYNEV & I-DYNEV	109
B.4	MASSVAC	109
B.5	OREMS	110
B.6	ETIS	112
B.7	Evacuatiemodel in het DSS Emergency Planning	113
B.8	Evacuatie Calculator in het HIS	114
B.9	Andere	115

B.10 Opmerkingen	115
B.10.1 Decision Support Systems (DSS)	115
B.10.2 Case studies	116
C Sioux Falls	118
C.1 Opbouw	118
C.2 Netwerkgegevens	118
D Link Transmission Model	124
D.1 Verkeersstroommodellen	124
D.2 Uitwerking oplossingsmethode LTM	125
D.2.1 Algemeen	125
D.2.2 Sending flows	127
D.2.3 Receiving flows	128
D.2.4 Knoopmodellen	129
E Optimalisatie van contraflow	130
E.1 Bepaling van de te onderzoeken alternatieven	130
E.1.1 Alternatieven 1 t.e.m. 13	130
E.1.2 Alternatieven 3bis en 14 t.e.m. 17	134
E.2 Postprocessing	136
E.2.1 Classificatie van de alternatieven	136
E.2.2 Gevoeligheid van de oplossing voor keuze van α , β , γ en δ	136
Bibliografie	139

Lijst van figuren

1.1	Opbouw van de thesis	4
1.2	Veiligheidsketen	8
1.3	Tijdsverloop van een preventieve evacuatie	10
1.4	Tijdsverloop van een reactieve evacuatie	11
1.5	Fasen in het evacuatieproces	12
1.6	Evacuatieproces als dynamisch proces	13
2.1	Fasen in de rampenplanning	17
2.2	Zonering van het rampterrein: schematisch	22
2.3	Zonering van het rampterrein: praktisch	23
2.4	Zonering in het verkeersplan van de Antwerpse haven	25
2.5	Speciale verkeersborden in de Antwerpse haven	26
3.1	Mogelijke vormen van contraflow	35
3.2	Mogelijk ontwerp voor beginpunt van contraflow	36
3.3	Mogelijke ontwerpen voor eindpunt van contraflow	37
3.4	Variable Message Sign op 11 september 2001	41
4.1	Hiërarchie binnen de rampbestrijding	51
4.2	Architectuur DSS Emergency Planning	58
5.1	Algemeen kader van het modelleren van evacuaties	64
5.2	Poissonverdeling	71
5.3	S-curven als responscurve	73
5.4	Logistische curve	74
6.1	Het geschematiseerde netwerk van Sioux Falls	82
6.2	Tijdsprofiel van de vraag in een knoop	85
6.3	Snelste route-boom	86
6.4	Principe cumulatieve functies	87
6.5	Cumulatieve functie voorbij knoop 1	89

6.6	Bepaling evacuatielijd knoop 19	90
6.7	Bepaling evacuatielijd knoop 9	91
6.8	Vergelijking totaal uitstroomprofiel alternatieven 0 en 17	92
6.9	Beste 3 alternatieven indien $\alpha = 3$, $\beta = 1$, $\gamma = 1$ en $\delta = 0,0833$ u/km	96
A.1	Situering broomincident	103
A.2	Afdammen en bedekken van het broom	104
B.1	Voorbeeld van output van OREMS	111
C.1	Het wegennet van Sioux Falls	119
C.2	Het geschematiseerde netwerk van Sioux Falls	120
D.1	Driehoekig fundamenteel diagram	126
D.2	Algemene knoop	129
E.1	Alternatieven 1 t.e.m. 8 (inclusief 3bis)	131
E.2	Alternatieven 9 t.e.m. 17	132

Lijst van tabellen

2.1	De verschillende fasen in de rampenplanning	16
6.1	Alternatieve contraflowplannen	83
6.2	Overzicht beoordelingsparameters voor de verschillende alternatieven	94
C.1	Knoopgegevens Sioux Falls	121
C.2	Linkgegevens Sioux Falls (links 1 t.e.m. 38)	122
C.3	Linkgegevens Sioux Falls (links 39 t.e.m. 76)	123
E.1	Individuele evacuatie tijden [u] voor de alternatieven 0 t.e.m. 13	133
E.2	Vergelijking tussen maximale vraag en capaciteit voor een aantal links	134
E.3	Individuele evacuatie tijden [u] voor alternatieven 3bis en 14 t.e.m. 17	136
E.4	Classificatie van de alternatieven ($\alpha = 3, \beta = \gamma = 1, \delta = 0,0833$ u/km)	137
E.5	Gevoeligheid van de oplossing voor keuze van α, β, γ en δ	138

Hoofdstuk 1

Inleiding

In dit inleidend hoofdstuk wordt eerst aangegeven wat de aanleiding tot dit onderzoek is, waarna de onderzochte problematiek duidelijk wordt afgebakend. Vervolgens wordt kort aangegeven hoe dat probleem werd aangepakt en hoe deze tekst is opgebouwd. Tenslotte volgt een omschrijving van de belangrijkste begrippen.

1.1 Aanleiding

Rechtstreekse aanleiding tot het onderzoeken van de *robuustheid van verkeersnetwerken bij rampen en evacuaties* is het zogenaamde “broomincident”: begin maart 2004 kantelde even na de middag een tankwagen geladen met zowat 6 800 liter broom in de Antwerpse haven. In bijlage A wordt het verloop van deze ramp gedetailleerd beschreven. Samengevat komt het erop neer dat een deel van het broom in de riolen terecht kwam en bij de uitstroming van de riool in een waterloop enkele kilometers verderop giftige gaswolken veroorzaakte. Daardoor dienden in eerste instantie 800 personen geëvacueerd te worden uit het naburige Ekeren. Een paar uur later verergerde de situatie doordat de wind ging liggen en de gaswolk Ekeren meer bedreigde. In totaal werden 3 000 personen geëvacueerd. Daarenboven moesten twee belangrijke verkeersassen ten noorden van Antwerpen, de A12 en de Noorderlaan, plaatselijk volledig worden afgesloten. Dit leidde tot een gigantische verkeerschaos tot 's avonds laat: de hele Antwerpse ring liep volledig vast, op de E19 reikte de file tot voorbij Brecht (ongeveer 20 km verder) en op de E17 tot in Kruike, eveneens 20 km verder (De Standaard 05/03/2004).

De verkeerschaos was dus het gevolg van het afsluiten van één autoweg en één secundaire weg en niet zozeer t.g.v. de evacuatie van enkele duizenden mensen. De vraag stelt zich echter wat er gebeurd was indien niet alleen (een deel van) Ekeren, maar bv. de hele stad Antwerpen geëvacueerd had moeten worden. Zo ondenkbaar is dat scenario niet: de Antwerpse haven is één van de grootste chemische sites ter wereld. Zou het in voorkomend geval überhaupt mogelijk geweest zijn om 300 000 i.p.v. 3 000 personen in veiligheid te brengen binnen een

korte termijn? Zelfs indien geen wegen zouden afgesloten zijn, kan men zich inbeelden dat zulke operatie niet zonder problemen zal verlopen. Dat blijkt zelfs al uit het evaluatierapport van het broomincident (zie bijlage A.3), waar besloten wordt dat *“de operationele aspecten van de interventie blijkbaar vlot verlopen, maar dat een massale evacuatie het grote knelpunt blijkt”*.

Een andere recente gebeurtenis, de aanslagen van 11 september in New York en Washington, had reeds geleid tot een verhoogde aandacht voor de verkeersafwikkeling bij rampen. In het Zuiden van New York moesten 280 000 inwoners en 1 000 000 werkers geëvacueerd worden. De getroffen site, het World Trade Center, was daarenboven juist de grootste intermodale hub van New York. Daarbij kwam dat uit veiligheidsoverwegingen alle bruggen en tunnels en een aantal autosnelwegen in de regio werden gesloten. Ook het openbaar vervoer werd grotendeels lamgelegd. De hulpdiensten ondervonden ernstige moeilijkheden om Manhattan te bereiken t.g.v. de verkeerschaos die bij dit alles ontstond (US Department of Transportation, 2003).

1.2 Probleemstelling

Bij een ramp is slachtofferhulp uiteraard prioritair t.o.v. een verkeersafwikkeling. Toch verdient deze laatste een belangrijke plaats in de rampenbestrijding: een vlot verlopende evacuatie kan zeer veel leed besparen en de hulpdiensten bereiken sneller de rampsite. Voorgaande paragraaf toont aan dat in desbetreffende situaties het verkeer vrijwel onmiddellijk vastliep. Niet te verwonderen overigens als je weet dat het verkeersnetwerk in normale omstandigheden al overbelast is.

De primaire vraag in dit onderzoek is bijgevolg: “Is het bestaande verkeersnetwerk robuust genoeg of leidt een extreem grote verkeersvraag “per definitie”, d.w.z. welke maatregelen je ook zou treffen, tot algehele chaos en stilstand op de wegen?” Of is er daarentegen door goed management al veel op te lossen en welke maatregelen kan men dan best wel en welke best niet treffen? Het is duidelijk dat deze vraag nog steeds ruim te interpreteren valt en dat er heel wat mogelijke invalshoeken zijn. In deze paragraaf trachten we het probleem dan ook zo scherp mogelijk te omschrijven. Verduidelijking en omschrijving van een aantal begrippen zoals ramp, evacuatie, robuustheid, enz. zijn terug te vinden op het einde van dit hoofdstuk.

We bestuderen een extreem grote verkeersvraag die veroorzaakt wordt door grootschalige evacuaties bij (dreigende) rampen, aanslagen, enz. Het gaat dus meer bepaald om rampspoedige situaties waarbij plots een enorm grote vraag voor verplaatsingen van mensen, dieren en/of goederen ontstaat. Deze thesis kadert binnen het uitgebreide domein van het *emergency management*.

Eventueel zou men daarenboven de situatie kunnen bekijken waarbij het verkeersnetwerk zelf getroffen wordt door de ramp, zoals bv. het noodgedwongen afsluiten van de A12 bij het broomincident. In eerste instantie zal onze aandacht *niet* uitgaan naar deze uitbreiding van het probleem, hetgeen echter niet wil zeggen dat dit een onbelangrijk facet van de problematiek zou zijn. Eigenlijk behoort dit tot het domein van het *incident management*, waar o.a. wordt bestudeerd hoe de gevolgen van een incident op het verkeersnetwerk zoveel mogelijk beperkt kunnen worden. Voor meer informatie over *incident management* verwijzen we naar Dewil & Laurent (2004).

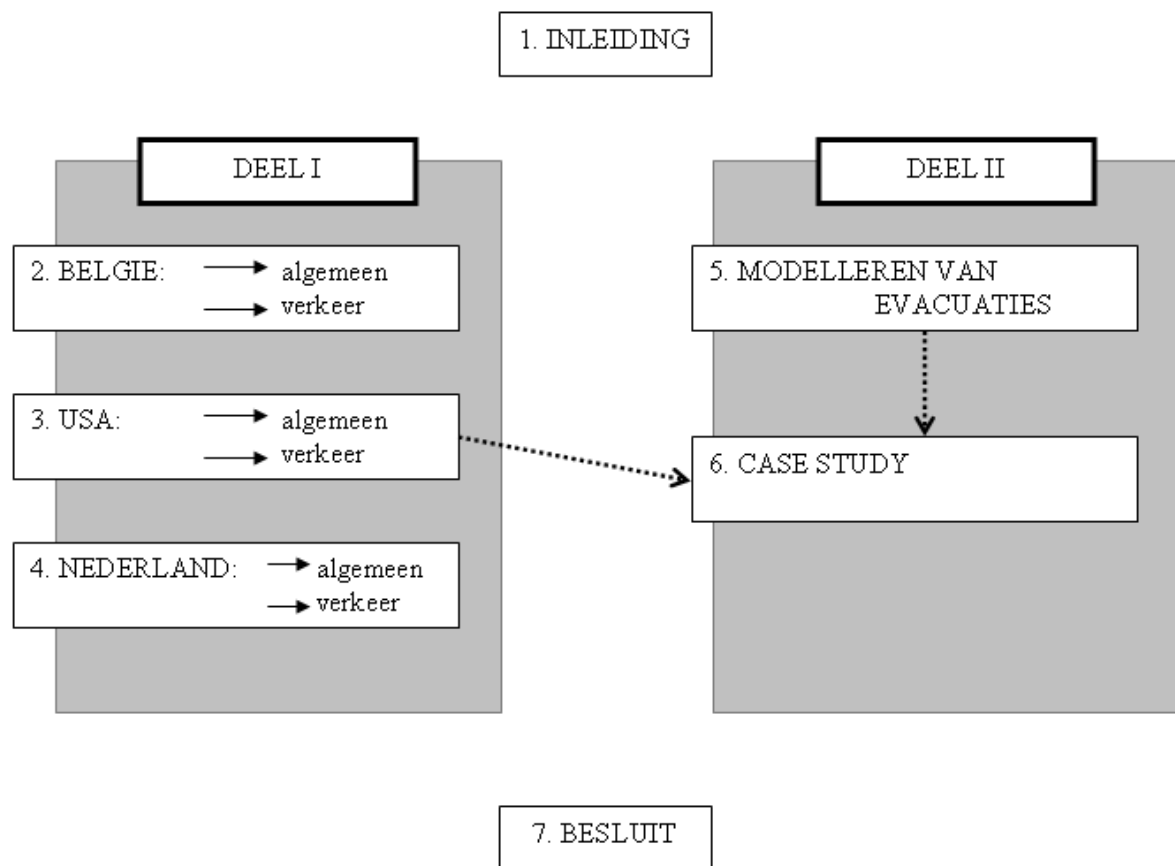
De verkeersproblematiek bij het broomincident valt dus in feite onder het *incident management*, aangezien deze het gevolg was van een sterk gedaalde capaciteit van het verkeersnetwerk, hetgeen op zijn beurt een gevolg was van het ongeluk. Met gekende incident management maatregelen, zoals bv. het verspreiden van informatie over de omleidingen, kan deze verkeersproblematiek worden aangepakt. We haalden het broomincident echter aan als aanleiding voor dit onderzoek: wat zou er gebeurd zijn indien 300 000 personen moesten geëvacueerd worden? Waar onze aandacht in het kader van deze thesis immers vooral naar uitgaat, is de afwikkeling van de evacuatie die met een ramp gepaard gaat.

Hoe bij zulke rampspoedige situaties moet opgetreden worden en wie welke verantwoordelijkheden draagt, wordt beschreven in de diverse rampenplannen. Hieraan gekoppeld stelt zich eveneens de vraag in hoeverre er in die rampenplannen over verkeersregelingen wordt gesproken en in hoeverre die verkeersregelstrategieën optimaal zijn.

1.3 Doel en opbouw van de thesis

Deze thesis bestaat uit twee grote delen. In het eerste deel wordt de huidige praktijk in België, USA en Nederland op het gebied van verkeersregeling bij rampen en evacuaties beschreven. Het tweede deel handelt over modelleren van evacuaties, waarbij eerst uitgebreid wordt besproken wat daar allemaal bij komt kijken en hoe dit alles praktisch kan worden uitgewerkt en vervolgens wordt toegepast in een case study. Deze opbouw wordt getoond in figuur 1.1.

Na dit inleidend hoofdstuk, wordt in het eerste deel van deze thesis eerst (**hoofdstuk 2**) onderzocht hoe in België momenteel het verkeer geregeld wordt bij rampen en de eventueel bijhorende evacuaties. Er wordt gezocht naar het antwoord op vragen als: Wie is verantwoordelijk voor de verkeersregeling in zulke situaties? Hoe gaat men in principe te werk in zulke situaties? Bestaan er specifieke verkeersregelplannen en zo ja, waaruit bestaan deze dan precies? Ter beantwoording van deze vragen wordt eerst aangegeven hoe de rampenplanning in België is georganiseerd en hoe de rampenbestrijding verloopt. Op deze manier kan de verkeersregeling binnen het geheel van de rampenbeheersing gesitueerd worden. Met deze



Figuur 1.1: Opbouw van de thesis

informatie kan dan bij de betrokken diensten een zoektocht gestart worden naar de huidige praktijk en eventuele bestaande verkeersregelplannen. Met het resultaat van die zoektocht wordt dit hoofdstuk afgesloten.

Het is algemeen bekend dat de Verenigde Staten, in tegenstelling tot België, regelmatig geconfronteerd worden met grootschalige evacuaties. Daarom wordt de huidige praktijk in de Verenigde Staten uit de doeken gedaan in **hoofdstuk 3**. Juist omdat grootschalige evacuaties daar niet zo uitzonderlijk zijn als in België, mag men verwachten dat uit de studie van de Amerikaanse state-of-the-practice een heel palet aan mogelijke maatregelen ter bevordering van de verkeersafwikkeling bij evacuaties naar voren zal komen. In dit hoofdstuk gaat de aandacht dan ook enkel uit naar verkeer bij evacuaties en dus niet bij rampen waarmee geen extreem grote verkeersvraag gepaard gaat. Wel wordt gestart met een beschrijving van enkele algemene zaken, zoals het beleid en de bevoegheidsverdeling op het gebied van de rampenbeheersing.

Het zou echter enigszins ‘oneerlijk’ zijn de Belgische praktijk te vergelijken met de Amerikaanse. Daarom, en om het zicht op mogelijke te treffen maatregelen verder te verbreden, wordt in **hoofdstuk 4** de huidige praktijk in Nederland behandeld. Ook hier wordt gestart met een beschrijving van het beleid e.d. inzake rampenbeheersing. Vervolgens worden enkele bestaande concrete verkeersregelplannen besproken. Zowel op het niveau van de organisatie van de rampenbeheersing als wat betreft de verkeersregeling bij rampen en evacuaties wordt de vergelijking gemaakt met België.

De verkeersregeling bij een evacuatie kan verbeterd worden door het vooraf opstellen van evacuatieplannen, waarin de verschillende te treffen maatregelen concreet worden uitgewerkt. Om verschillende mogelijke evacuatieplannen te testen en onderling te vergelijken kan men gebruik maken van verkeersmodellen. Het tweede gedeelte van deze thesis spitst zich toe op het modelleren van het verkeer, maar dan specifiek bij evacuaties. In **hoofdstuk 5** wordt eerst duidelijk het belang en het nut van het modelleren aangegeven, waarna het algemene kader rond evacuatiemodellering wordt beschreven. Na een korte vergelijking met het modelleren van het verkeer in ‘normale’ omstandigheden en bij evacuaties, worden de verschillende deelstappen van het algemene kader gedetailleerd uitgewerkt. Tenslotte wordt een overzicht gegeven van de bestaande evacuatiemodellen en -pakketten.

In **hoofdstuk 6** wordt aan de hand van een case study een eigen, concrete uitwerking van het algemene kader rond evacuatiemodellen voorgesteld. De case betreft het selecteren van het ‘beste’ evacuatieplan. Als te onderzoeken robuustheidsverhogende maatregel pikken we, uit alle in het eerste deel vermelde mogelijkheden, *contraflow* uit. Contraflow is het omdraaien van de rijrichting op de inwaartse rijstroken van een autosnelweg, waardoor het evacuerende verkeer een veel grotere capaciteit ter beschikking krijgt (zie hoofdstuk 3). Vraag is echter op welke delen van het netwerk best contraflow wordt ingevoerd, er rekening mee houdend dat hiermee een belangrijke kost gepaard gaat. Met behulp van het voorgestelde evacuatiemo-

del wordt de verkeersafwikkeling gesimuleerd voor een aantal alternatieve evacuatieplannen met telkens een verschillende combinatie van links waarop contraflow wordt toegepast. In het voorgestelde evacuatiemodel neemt het *Link Transmission Model*, een recentelijk aan de K.U.Leuven ontwikkeld verkeersstroommodel, een belangrijke plaats in. Na het vastleggen van een doelfunctie, aan de hand waarvan de opbrengsten worden afgewogen tegen de kosten, kan dan de ‘optimale’ combinatie van contraflow aangeduid worden.

1.4 Begripsomschrijving

1.4.1 Robuustheid van een verkeersnetwerk

De robuustheid van een systeem is de graad waarin dat systeem in staat is te blijven functioneren ingeval ernstige verstoringen (Immers *et al.*, 2004).

De ‘ernstige verstoring’ waarvan sprake is in deze context een abnormaal hoge verkeersvraag t.g.v. een evacuatie bij een ramp. Het verkeersnetwerk is niet ontworpen om hele gebieden tegelijkertijd te evacueren. Een robuust verkeersnetwerk is een netwerk dat er toch in zekere mate in slaagt zijn functie uit te oefenen, nl. het verkeer zo vlot mogelijk af te wikkelen zodat iedereen zo snel mogelijk het getroffen gebied kan verlaten.

1.4.2 Ramp

Het is niet eenvoudig het begrip ‘ramp’ te definiëren. Rampen kunnen immers zeer verschillend zijn wat betreft de oorzaak, de aard of de ernst. Het kan gaan om een plotselinge gebeurtenis of om een sluipend fenomeen (droogte, sluipende milieuverontreiniging, . . .). Ook kan er onderscheid gemaakt worden tussen enerzijds een natuurramp zoals een storm, een aardbeving of watersnood en anderzijds een ramp t.g.v. een menselijk handelen zoals vliegtuigongevallen, ontploffingen, aanslagen e.d. Tenslotte zijn sommige rampen enigszins voorspelbaar (overstroming, orkaan) en andere totaal niet (aanslag, aardbeving).

In art. 1 van de Nederlandse Rampenwet van 30 januari 1985 definieert men een ramp als zijnde “*een gebeurtenis (a) waardoor een ernstige verstoring van de openbare veiligheid is ontstaan, waarbij het leven en de gezondheid van vele personen, het milieu of grote materiële belangen in ernstige mate worden bedreigd of zijn geschaad, en (b) waarbij een gecoördineerde inzet van diensten en organisaties van verschillende disciplines is vereist om de dreiging weg te nemen of de schadelijke gevolgen te beperken*”. Het tweede element in deze definitie onderscheidt een ramp van een ‘gewoon’ ongeval, waarbij niet zal voldaan zijn aan deze tweede voorwaarde.

Er bestaan nog talrijke andere definities. Het komt echter steeds neer op het feit dat ernstige rampen of calamiteiten worden gekenmerkt door volgende elementen:

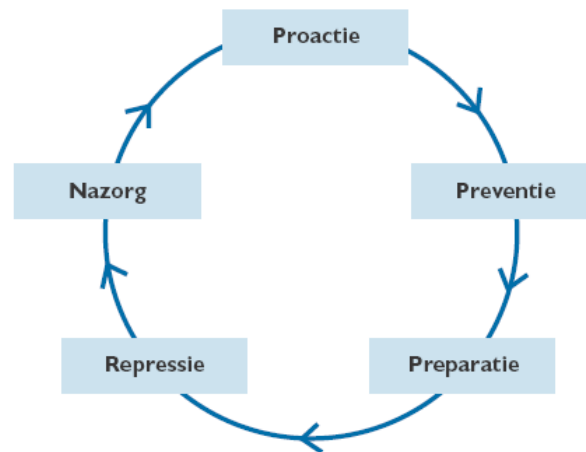
- het gaat om een onverwachte gebeurtenis;
- onder de vorm van een ‘nefast verschijnsel’;
- waarbij aanzienlijke schade kan optreden: mensenlevens, omgevingsschade, materiële schade, indirecte financiële schade, . . . ;
- waarbij de hulpverleners initieel over onvoldoende middelen en informatie beschikken;
- er is een tijdskritische factor en bijgevolg een geringe beslissingstijd;
- de inzet van aanzienlijke middelen en van onderlinge coördinatie is vereist;
- de hulpverleners kunnen blootgesteld zijn aan fysieke en psychische stress;
- de uitkomst is bij aanvang van de hulpverlening onzeker.

In de Belgische wetgeving (meer bepaald de wet van 31 december 1963 betreffende de civiele bescherming) wordt onderscheid gemaakt tussen:

- **Catastrofen:** dit zijn ernstige gebeurtenissen en zware ongevallen die een omvangrijk gebied treffen, veroorzaakt door de menselijke activiteit.
bv.: neerstorten van een vliegtuig, ontsnapping van een gifwolk, ontploffing in een risico-installatie of t.g.v. een ongeval met een tankwagen
- **Rampspoedige gebeurtenissen:** dit zijn ernstige gebeurtenissen die een omvangrijk gebied treffen, veroorzaakt door natuurverschijnselen, met name weersverschijnselen. Net zoals de catastrofes kunnen zij enorme schade veroorzaken en personen in gevaar brengen.
bv.: stormen, tornado's, aardbevingen, overstromingen
- **Schadegevallen:** dit zijn lokale gebeurtenissen die enkel kunnen worden opgelost met meer dan alleen lokale middelen. Zij kunnen veroorzaakt worden door ofwel de menselijke activiteit ofwel natuurverschijnselen.
bv.: verkeersongeval dat het inzetten van speciale takel- of hijsmiddelen noodzakelijk maakt, een grondverschuiving

1.4.3 Veiligheidsketen

De **veiligheidsketen** is een schematische voorstelling van alle activiteiten die gericht zijn op het bevorderen van de veiligheid (Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties Nederland, 2003). In deze keten zijn, zoals aangegeven op figuur 1.2 (bron: Ministerie van



Figuur 1.2: Veiligheidsketen

Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties Nederland (2003)), vijf schakels te onderscheiden: pro-actie, preventie, preparatie, repressie en nazorg.

Pro-actie betekent het wegnemen of vermijden van structurele oorzaken van onveiligheid, teneinde het ontstaan van onveiligheid tegen te gaan. Vooral op het terrein van ruimtelijke ordening en infrastructuur kan vroegtijdig rekening gehouden worden met het ontstaan van veiligheidsrisico's. Zo is het bv. niet ideaal om een woonwijk in te planten in de nabije omgeving van een chemische fabriek. Door aan de hand van gepaste wetgeving en normstelling zulke situaties uit te sluiten, kunnen heel wat risico's vermeden worden. Pro-actie is de belangrijkste schakel in de veiligheidsketen: voorkomen is beter dan genezen. Niet alle risico's kunnen echter worden voorkomen. Alleen al door wonen, werken, leven en transport ontstaan immers bepaalde veiligheidsrisico's.

Preventie is er op gericht om die risico's zoveel mogelijk te beperken en de gevolgen van eventuele rampen te minimaliseren. Preventie omvat het stellen van eisen inzake vergunningen voor gebouwen (bv. brandtrap), transport en opslag van gevaarlijke stoffen, infrastructuur (bv. vluchtwegen in tunnels), industrieterreinen, enz.

Een goede pro-actie en preventie sluiten echter niet uit dat er zich nog steeds rampen kunnen voordoen. Om voorbereid te zijn op een ramp, is dan ook een degelijke **preparatie** nodig, welke bestaat uit: planvorming, oefening, opleiding, informatievoorziening en aanschaf van het nodige materieel.

Het daadwerkelijk bestrijden van de ramp wordt de **repressie** genoemd. Men gaat de onveiligheid trachten weg te nemen en voor de nodige hulpverlening zorgen. Voorbeelden hiervan zijn: het blussen van een brand, het verzorgen van de gewonden, het afzetten van het rampgebied, enz.

Het sluitstuk van de veiligheidsketen is de **nazorg**. In deze fase gaat het erom terug te keren

naar de normale situatie. De nazorg betreft activiteiten als verdere medische en sociaal-psychische verzorging van slachtoffers, milieuzorg, herstellingen, enz. Ook het evalueren van de aanpak van de ramp is een onderdeel van de nazorg. Het is belangrijk om uit het verloop van de ramp en de bestrijding ervan lessen te trekken naar de toekomst toe. Dit sluit dan de veiligheidsketen van figuur 1.2.

In verband met de geschetste veiligheidsketen spreekt men verder over de begrippen rampenbeheersing en rampenbestrijding. Het begrip **rampenbeheersing** omvat de vijf schakels uit de geschetste veiligheidsketen, van pro-actie tot nazorg. Het begrip **rampenbestrijding** is minder eenduidig gedefinieerd. Men kan rampenbestrijding zien als het geheel van preparatie, repressie en nazorg samen, omdat deze stappen steeds nodig zijn eenmaal een ramp opgetreden is. Dikwijls bedoelt men met rampenbestrijding echter ook enkel de repressie, hetgeen inderdaad het daadwerkelijk bestrijden is van een ramp. In wat volgt opteren we voor deze tweede mogelijkheid.

Tot slot vermelden we dat in het vervolg van de tekst met **rampenplanning** het gedeelte planvorming van de preparatie (derde schakel in de veiligheidsketen) bedoeld wordt.

1.4.4 Evacuatie

Een **evacuatie** kan gedefinieerd worden als een collectieve verplaatsing van mensen en eventueel dieren uit een bedreigd gebied naar een veilig(er) gebied binnen een relatief korte tijd. Die grootschalige verplaatsing vergt de inzet van transportmiddelen.

Evacuaties zijn “round-trip”-gebeurtenissen. Er is nl. een intentie om naar het bedreigde of getroffen gebied terug te keren eenmaal de dreiging voorbij is (Kalfsbeek, 2004, p. 24).

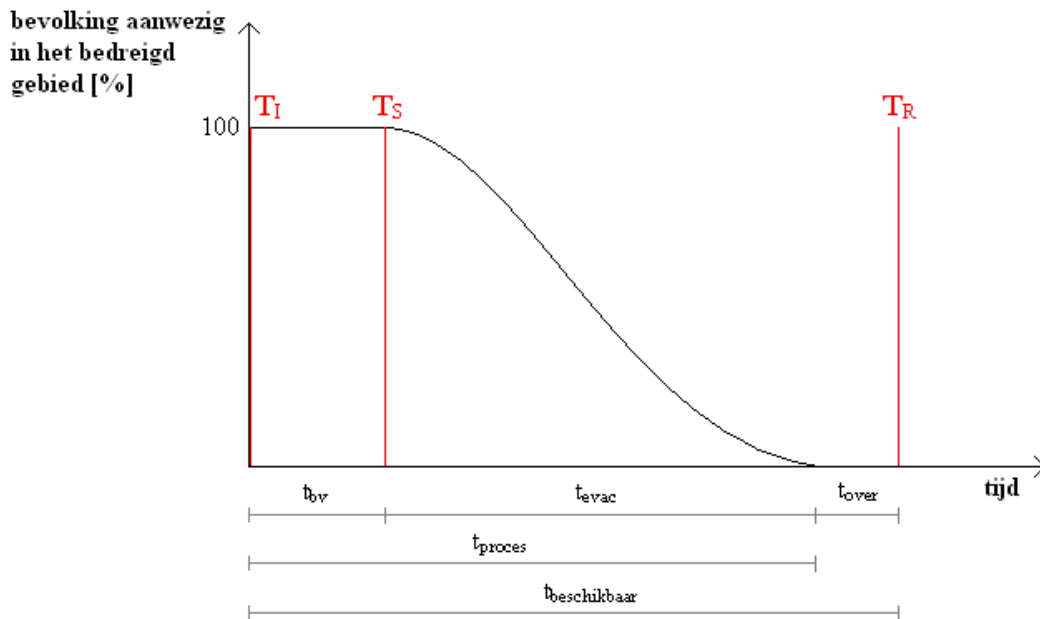
Evacuatietypes

Een evacuatie is een actie gericht op het beschermen van mensen en dieren tegen een bepaald (verwacht) effect van een ramp. Het betreft dus een reactie ofwel op een dreiging ofwel op een acuut gevaar. Op basis hiervan onderscheiden we twee evacuatietypes: preventieve en reactieve evacuaties.

Een **preventieve** of **pre-impact** evacuatie heeft als doel het voorkomen dat een dreigende ramp (bv. orkaan, overstroming, bosbrand, ...) effect gaat hebben op de bevolking in het potentiële rampgebied.

Een **reactieve** of **post-impact** evacuatie daarentegen heeft als doel het beëindigen van het effect van een ramp (bv. ontploffing, aanslag, ...) op de bevolking.

Het grote verschil tussen beide categorieën is de beschikbare tijd voor het doorlopen van het evacuatieproces. Daarmee samenhangend is het gedrag van de mensen. Bij een preventieve



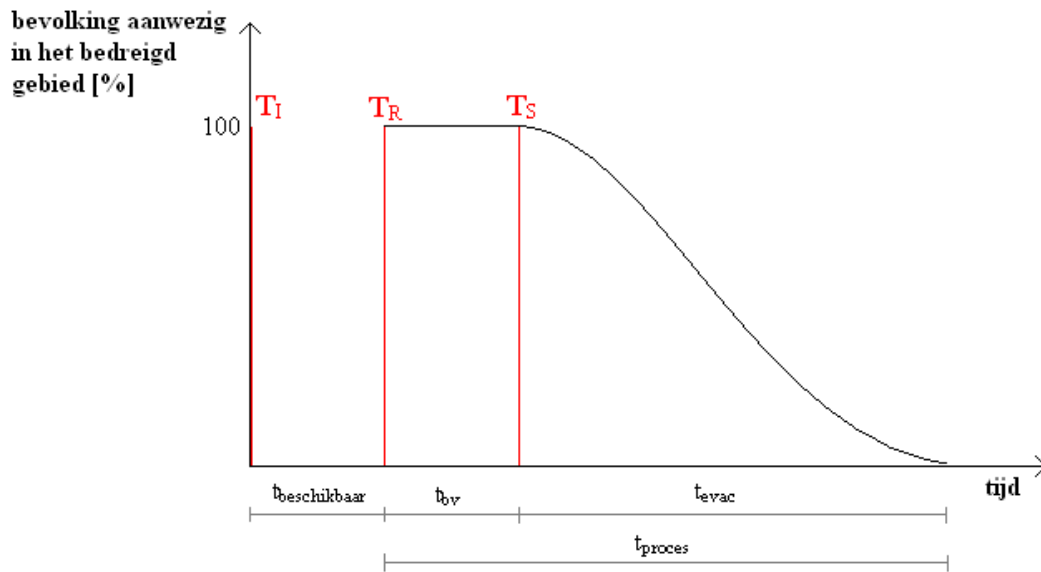
Figuur 1.3: Tijdsverloop van een preventieve evacuatie

evacuatie is er nog enige tijd beschikbaar vooraleer de ramp toeslaat, zodat er wel angst heerst bij de bevolking maar er toch nog sprake is van een relatieve rust. Het andere geval, wanneer de ramp reeds opgetreden is, wordt meestal gekenmerkt door paniek en chaos.

Het verschil tussen beide categorieën wordt verder verduidelijkt in de figuren 1.3 en 1.4 (bron: Kalfsbeek (2004, p. 27-28)), waar kwalitatief het verloop van de evacuatie (voorgesteld door het percentage van de bevolking dat zich nog in het rampgebied bevindt) in functie van de tijd wordt weergegeven.

Bij een *preventieve* evacuatie zijn er drie belangrijke tijdstippen te onderscheiden. T_I is het eerste tijdstip waarop het dreigend gevaar waargenomen wordt of waarop een incident zich voordoet dat kan aanleiding geven tot evacuatie. Het horizontale deel van de curve in figuur 1.3 geeft de besluit- en voorbereidingsfase t_{bv} weer. Daarna (vanaf T_S) wordt gestart met de evacuatie, die een tijd t_{evac} vergt. Idealiter duurt het na het beëindigen van de evacuatie nog een tijd t_{over} vooraleer de ramp zich uiteindelijk manifesteert op T_R . De resterende tijd t_{over} is gelijk aan het verschil tussen de beschikbare tijd $t_{beschikbaar}$ (van T_I tot T_R) en t_{proces} , de tijd die het kost om het ganse evacuatieproces te doorlopen. Op de verschillende fasen in het evacuatieproces gaan we verder in in de volgende paragraaf.

Een *reactieve* evacuatie (figuur 1.4) start pas nadat de ramp zich heeft voorgedaan: T_S valt na T_R . Daarenboven is er dus geen beschikbare tijd $t_{beschikbaar}$ voorhanden, waardoor geen curve tussen T_I en T_R getekend is. Toch is ook hier enige voorbereiding gewenst, hetgeen



Figuur 1.4: Tijdsverloop van een reactieve evacuatie

het horizontale deel van de curve tussen T_R en T_S verklaart. Wel is het zo dat t_{bv} voor een reactieve evacuatie aanzienlijk kleiner zal zijn dan voor een preventieve, omwille van de nog hogere tijdsdruk.

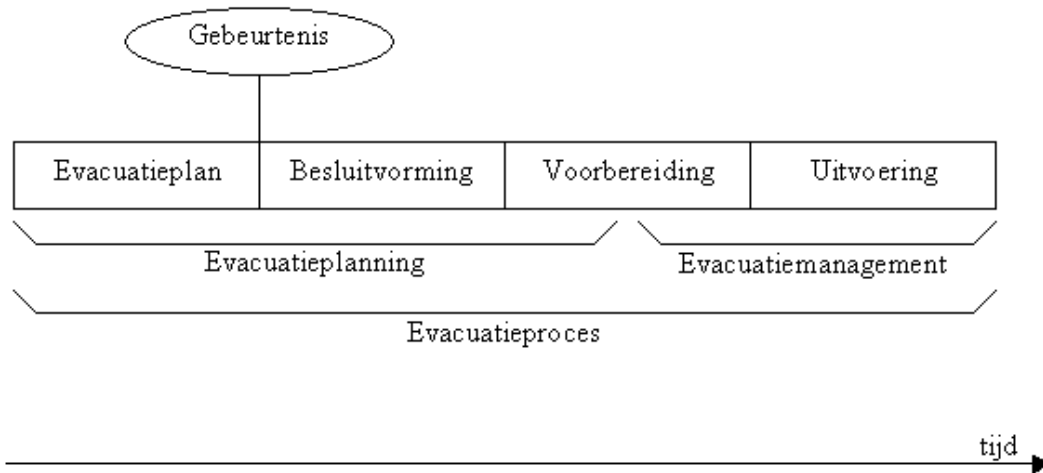
Fasen in het evacuatieproces

We onderscheiden vier opeenvolgende fasen in het evacuatieproces:

- opstellen van het evacuatieplan;
- besluitvorming (evacueren ja of nee?);
- voorbereiden van de evacuatie;
- uitvoeren van de evacuatie.

In figuur 1.5 (bron: Kalfsbeek (2004, p. 29)) wordt dit schematisch weergegeven op een tijdslijn. Wanneer de besluitvormingsfase start is afhankelijk van het type evacuatie. Voor een preventieve evacuatie is dit T_I , het eerste tijdstip waarop het dreigend gevaar kan herkend worden; voor een reactieve evacuatie is dit T_R , het ogenblik waarop de ramp zich voordoet. Deze worden in de figuur algemeen aangegeven als ‘gebeurtenis’.

Evacuatieplanning omvat, naast het maken van het evacuatieplan en het nemen van een besluit, ook een gedeelte van de voorbereiding van de evacuatie. Het is immers meestal nodig de bestaande evacuatieplannen aan te passen aan de reële situatie en omstandigheden. Dit neemt uiteraard niet weg dat het opstellen van een evacuatieplan erg nuttig is voor het



Figuur 1.5: Fasen in het evacuatieproces

versnellen van het eigenlijke evacuatieproces, wat op zijn beurt de immense tijdsdruk kan verkleinen.

Evacuatiemanagement omvat het tweede gedeelte van de voorbereiding (informerende van de bevolking, afzetten van routes, ...) en het evacueren zelf.

Het evacuatieproces kan ook anders bekeken worden, meer bepaald als een dynamisch proces (figuur 1.6, bron: Kalfsbeek (2004, p. 29)). Met *pre-event planning* wordt het opstellen van het evacuatieplan bedoeld. De *post-event planning* behelst dan de besluitvorming en het aanpassen van het evacuatieplan aan de omstandigheden. Monitoring houdt de beschrijving van het evacuatieproces in en de opgedane ervaringen, zodat dit tijdens de inventarisatie kan geanalyseerd worden. De uit die analyse getrokken lessen worden via de terugkoppeling dan verwerkt in de nieuwe evacuatieplannen.

Hoofdstuk 2

Verkeersmanagement bij rampen: België

In dit hoofdstuk wordt onderzocht wat de stand van zaken is in België op het gebied van verkeersregeling bij rampen en evacuaties. Eerst wordt het algemeen kader hierrond geschetst, meer bepaald door aan te geven hoe in België het rampenmanagement en de rampenplanning zijn georganiseerd. Vervolgens wordt de plaats van de verkeersregeling binnen de rampenplannen aangegeven en worden de belangrijkste facetten van de huidige Belgische praktijk besproken. Dit hoofdstuk wordt afgerond met een overzicht van de bestaande verkeersregelingen.

2.1 Rampenmanagement en rampenplanning

Het rampenmanagement of de rampenbestrijding bestaat uit het aanwenden van alle middelen (personeel en materieel) die noodzakelijk zijn om rampspoedige gebeurtenissen, catastrofes of schadegevallen te bestrijden. Deze middelen worden ook ‘maatregelen van civiele bescherming’ genoemd.

De in dit verband te nemen beslissingen vallen op nationaal vlak onder de verantwoordelijkheid van de Minister van Binnenlandse Zaken, op provinciaal vlak onder de verantwoordelijkheid van de provinciegouverneur en op lokaal vlak onder de verantwoordelijkheid van de burgemeester.

Meer concreet zullen het echter de bevelhebbers van de interventieploegen van de brandweer zijn die de technische hulpoperaties op het terrein zullen leiden.

De bij de rampenbestrijding te volgen procedures, de taken en de verantwoordelijkheden van de verschillende hulpdiensten, overheden, enz. worden beschreven in de rampenplannen, welke kunnen aanzien worden als de basis om orde te scheppen in de chaos die heerst bij aanvang van een ramp. We bespreken dan ook eerst deze rampenplannen vooraleer kort in te gaan op de daadwerkelijke rampenbestrijding.

2.1.1 Rampenplanning

Men onderscheidt twee soorten rampenplannen. Enerzijds zijn er de *openbare* rampenplannen (op gemeentelijk, provinciaal en federaal niveau), anderzijds zijn er de *interne* noodplannen van bedrijven, ziekenhuizen, openbare gebouwen, enz. Enkel de openbare rampenplannen worden hier verder besproken.

Binnen de openbare rampenplannen wordt verder onderscheid gemaakt tussen *algemene* openbare rampenplannen (d.w.z. algemeen toepasbaar voor alle soorten risico's) en *specifieke* openbare rampenplannen (specifiek voor bepaalde risico's waarmee desbetreffende overheden kunnen geconfronteerd worden, zoals risico's op wateroverlast, spoorweg- of luchtvaartongevallen, nucleaire risico's en Seveso-risico's¹). Op het federale niveau bestaat er geen algemeen openbaar rampenplan, maar bestaan enkel specifieke rampenplannen, zoals bv. het Nucleair Noodplan.

De openbare rampenplanning (en dus ook de rampenbestrijding zelf) berust op twee principes: *coördinatie* en *opschaling*. Coördinatie betekent dat men een welomschreven taakverdeling gaat gebruiken, waarbij men streeft naar een efficiënte en effectieve inzet van de manschappen en middelen. Opschaling slaat op het feit dat men het rampenplan gaat opdelen in fases, al naargelang de omvang en de evolutie van de calamiteit. Deze twee begrippen worden in de volgende punten verder uitgewerkt.

Coördinatie

De verschillende hulpverlenende diensten worden in het kader van de rampenbestrijding ingedeeld in verschillende disciplines, nl.:

- **discipline 1:** de bestrijding van de ongevallen, schadegevallen, catastrofes en rampspoedige gebeurtenissen. Betrokken diensten: brandweerdiensten en eenheden van de Civiele Bescherming indien deze ter versterking werden opgeroepen door de brandweerdiensten;
- **discipline 2:** de geneeskundige en sanitaire hulpverlening. Betrokken diensten: diensten van de dringende medische hulpverlening en evt. het Rode Kruis;
- **discipline 3:** de politie van de geteisterde plaatsen, d.w.z. de ordehandhaving, de verkeersregeling, bewaken van woningen en goederen achtergelaten in geval van evacuatie,

¹Seveso-bedrijven zijn bedrijven die vallen onder de Seveso-richtlijn van de Europese Unie. Deze richtlijn was een reactie op het zware industriële ongeval in 1976 in het Italiaanse stadje Seveso, waarbij dioxines in de omgeving zijn vrijgekomen. De richtlijn legt veiligheidsvoorschriften en preventiemaatregelen vast, vooral voor bedrijven uit de (petro)chemische industrie. Momenteel is de richtlijn aan een tweede editie toe (Seveso II) en spreekt men van de Europese richtlijn 96/82/EG "betreffende de beheersing van de gevaren van zware ongevallen waarbij gevaarlijke stoffen betrokken zijn" (Federale Overheidsdienst Binnenlandse Zaken, 2005).

Tabel 2.1: De verschillende fasen in de rampenplanning

fase	grondgebied	autoriteit	rampenplan
fase I	gemeente	brandweer-burgemeester	gemeentelijk
fase II	gemeente	burgemeester	gemeentelijk
fase III	één of meerdere gemeenten	gouverneur	provinciaal
fase IV	één of meerdere provincies	minister van Binnenlandse Zaken	verschillende provinciale

het meedelen van richtlijnen aan de inwoners, enz. Betrokken diensten: lokale politie, federale politie en indien nodig diensten voor het gerechtelijk onderzoek;

- **discipline 4:** de logistieke ondersteuning, d.w.z. de bijstandsacties, het vervoer, enz. Betrokken diensten: Civiele Bescherming, gemeentelijke technische diensten, diensten van water-, energie- en telecommunicatiemaatschappijen en eenheden van het Belgisch Leger;
- **discipline 5:** de informatie aan de bevolking. Betrokken diensten: communicatieambtenaar, woordvoerder, media.

Deze verschillende disciplines moeten in het kader van een ramp plots gaan samenwerken. Deze samenwerking, evenals de samenwerking binnen een discipline zelf, moet goed geleid en gecoördineerd worden. Ook de communicatie tussen de verschillende diensten is van enorm groot belang. Welnu, in de rampenplannen worden de nodige commando-, coördinatie- en communicatiestructuren vastgelegd.

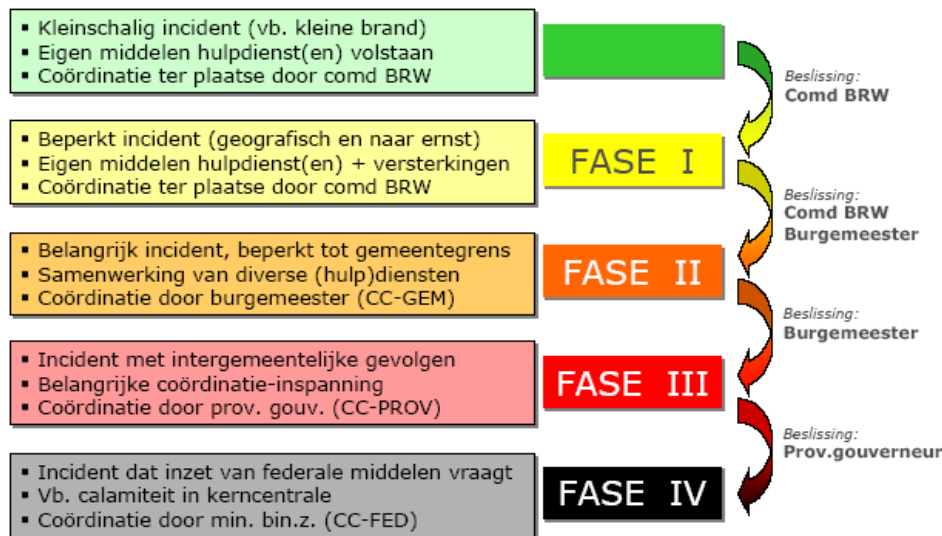
Opschaling of fasering

Binnen de rampenbestrijding worden vier alarmfasen onderscheiden. De ene ramp kan immers kleinschalig zijn, terwijl een andere ramp grootschalig van omvang kan zijn en bijgevolg de inzet van omvangrijke hulpverlenende middelen vereist. Daarenboven kan een ramp de geografische grenzen van één gemeente, stad of zelfs provincie overstijgen.

Om deze problematiek gestructureerd te kunnen aanpakken zijn de openbare rampenplannen geëchelonnerd. Naarmate de ernst en omvang van een calamiteit groter is, worden er verschillende fasen in een rampenplan geactiveerd of wordt er overgegaan op rampenplannen van een hoger bestuurlijk niveau. Het overgaan naar een hogere fase wordt opschaling genoemd. In tabel 2.1 worden de verschillende fasen weergegeven.

Belangrijke elementen in het begrip opschaling zijn:

- De persoon die het commando voert in een bepaalde fase beslist of er naar een hogere fase zal moeten overgegaan worden.



Figuur 2.1: Fasen in de rampenplanning

- Niet alle fasen moeten sequentieel doorlopen worden: een incident kan starten als fase II, of kan van fase I naar fase III gaan.
- De commando- en coördinatiestructuren die in een bepaalde fase zijn geactiveerd worden niet noodzakelijk opgedoekt indien naar een hogere fase wordt overgegaan; in vele gevallen zal er veeleer een functionele opdeling komen.
- Een hogere fase impliceert eerst en vooral meer complexe commando- en coördinatiestructuren en bovendien een langere opschalingstijd (hulpdiensten moeten van verder aanrijden, minder parate diensten worden opgevorderd, ...).

Deze fasering wordt nogmaals samengevat in figuur 2.1 (bron: Balthazar (2001)).

2.1.2 Rampenbestrijding

Wanneer er zich dan daadwerkelijk een rampsituatie voordoet, zal men deze met de nodige en beschikbare middelen bestrijden. De rampenplannen zorgen dan voor de nodige basis en afspraken om deze bestrijding zo gestructureerd en efficiënt mogelijk te laten verlopen. De twee basisprincipes, coördinatie en opschaling, komen dus tot uiting bij de rampenbestrijding en zouden eigenlijk even goed in deze paragraaf kunnen besproken worden. Hoe de verschillende disciplines bij die rampenbestrijding nu precies te werk gaan, past niet in het kader van deze thesis. Hiervoor wordt verwezen naar Balthazar (2001).

Bij het bestrijden van rampen moeten steeds twee verschillende niveaus onderscheiden worden:

- Het **beleid**: het nemen van de beslissingen zoals bv. of er moet geëvacueerd worden of hoeveel mensen er moeten geëvacueerd worden. Dit gebeurt binnen de beleidsstaf, nl.

het Coördinatiecomité (CC). Hierin zetelen vertegenwoordigers van de vijf disciplines, de leiding is in handen van de burgemeester of de gouverneur, afhankelijk van de fase waarin men zich bevindt;

- De **operaties** zelf: de daadwerkelijke operaties zoals bv. de verzorging van gekwetste personen of de verkeersregeling worden geleid en gecoördineerd door de operationele staf, nl. de CommandoPost Operaties (CP-Ops). De vertegenwoordigers (hoogste in graad) van de verschillende disciplines komen op de plaats van de ramp zelf samen onder leiding van de brandweercommandant. Dat het de brandweer is die de leiding neemt, is te wijten aan het feit dat enkel de brandweer het gevaar van een bepaalde situatie kan inschatten.

2.2 Verkeersregeling bij rampen

2.2.1 Werkwijze

Om de huidige Belgische praktijk van verkeersregeling bij rampen en eventuele evacuaties te achterhalen, werd als volgt te werk gegaan.

Er blijkt dat over dit onderwerp geen vrij beschikbare informatie te vinden is in de literatuur of op het internet. Daarom werd per e-mail informatie gevraagd aan de bevoegde personen en diensten in Vlaanderen, meer bepaald de provinciale en gemeentelijke overheden (aangezien zij verantwoordelijk zijn voor de rampenplanning) en een aantal korpsen van de lokale en federale politie (aangezien zij als discipline 3 bij de rampenbestrijding instaan voor het regelen van het verkeer). In totaal werden ongeveer dertig antwoorden gegeven op deze vraag. In de overgrote meerderheid van de antwoorden kwamen dezelfde gedachten en principes naar voren. Het was mogelijk een aantal plannen en documenten in te kijken. Daarenboven werd de kans geboden om een persoonlijk gesprek te voeren met een aantal specialisten ter zake, enerzijds personen bij de politie (op bovenlokaal niveau) en anderzijds ambtenaren bij de provinciale administratie (dienst rampenplanning). Zo werd er een persoonlijk gesprek gevoerd in elke Vlaamse provincie. Daar kan aangenomen worden dat deze specialisten op de hoogte zijn van al wat reilt en zeilt in 'hun' provincie op het gebied van verkeersregeling bij rampen, kan men ervan uit gaan dat een volledig beeld werd gevormd voor heel Vlaanderen.

Tenslotte werden een aantal Waalse provinciebesturen gecontacteerd. Op basis van de, zij het beperkte, respons kan toch afgeleid worden dat de praktijk in Wallonië niet afwijkt van deze in Vlaanderen.

De besluiten die op basis van al deze contacten kunnen worden genomen, worden hierna besproken.

2.2.2 Verkeersregeling binnen de rampenplannen

De in sectie 2.1.1 besproken openbare rampenplannen zijn te beschouwen als polyvalente noodplannen om de hulpverlening door verschillende interventiediensten voor te bereiden en te coördineren, zodat alle beschikbare middelen op de meest doeltreffende manier kunnen worden ingezet. Een algemeen rampenplan is echter een *zeer* algemeen rampenplan met weinig details. Het is eerder te beschouwen als een alarmeringsschema dat vastlegt wie wie en op welke manier verwittigt, dan een volledige en gedetailleerde beschrijving van alle acties die door de verschillende diensten dienen uitgevoerd. Ook in Nederland zijn de rampenplannen volgens dezelfde filosofie uitgewerkt (zie paragraaf 4.1.2). Dhr. van Eeden, medewerker bij de directie Crisisbeheersing van het Nederlandse Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijkrelaties, vatte dit samen door te stellen dat een rampenplan eigenlijk “een soort van telefoonboek” is (van Eeden, 2004). Hetzelfde geldt in grote mate eveneens voor de specifieke openbare rampenplannen, waar dan bijkomend een beschrijving wordt gegeven van de op voorhand gekende risico’s (bv. welke stoffen liggen hier opgeslagen?), de locatie (bv. de ligging van het Seveso-bedrijf: hoeveel mensen wonen in de omgeving?), enz. Het is wel zo dat een rampenplan de taakverdeling tussen de verschillende disciplines vastlegt, maar het bepaalt niet hoe een bepaalde discipline zijn taken moet uitvoeren.

Hoe één van de vijf disciplines nu te werk gaat, wordt intern binnen desbetreffende discipline zelf vastgelegd. Dit gebeurt in een InterventiePlan, d.i. een plan per discipline voor een doeltreffende aanpak van een incident. Het is meer gedetailleerd dan een rampenplan en bevat de specifieke procedures van een interventie.

Het meest bekende voorbeeld is het Medisch InterventiePlan (MIP) voor discipline 2 (geneeskundige hulpverlening). Dit plan bepaalt een drempel vanaf wanneer het kan afgekonddigd worden en welke middelen er automatisch dienen ingeschakeld te worden. Ook andere coördinerende en organisatorische regels worden vastgelegd.

Wat betreft discipline 3 (politie) bestaat er in een aantal provincies een zogenaamd Politieeel InterventiePlan (PIP). Dit bepaalt dan het politieeel antwoord dat kan gegeven worden op onvoorziene incidenten. De verschillende interventieplannen moeten echter wel passen binnen het kader van het algemeen rampenplan. Per provincie zullen bijgevolg de interventieplannen moeten uitgewerkt worden conform het provinciale algemene rampenplan. Anders gezegd: het provinciaal algemeen rampenplan is de bodem en andere zaken zoals interventieplannen dienen in die bodem geplant/gezaaid te worden.

Uit het voorgaande blijkt duidelijk dat er in de algemene rampenplannen zelf niets vermeld zal staan over uitgewerkte verkeersregelingen of strategieën die dienen te worden gevolgd bij de verkeersregeling bij rampen. Deze informatie moet bijgevolg gezocht worden binnen de politiediensten (discipline 3, die inderdaad als deeltaken o.a. het regelen van het verkeer in en

rond het rampgebied heeft) zelf. Het gaat echter nog een stapje verder. Zelfs in de Politie Interactie Plannen zal er geen concrete uitwerking te vinden zijn van (strategieën voor) de verkeersregeling. In het PIP worden bv. de communicatiestructuren, de organisatie en de hiërarchie vastgelegd om de goede (samen)werking van de verschillende politiediensten te verzekeren. Het PIP kan dus op zijn niveau ook als een algemeen plan aanzien worden. Voor specifieke en statische risicosituaties of -zones kan het PIP wel verder uitgewerkt worden tot een specifiek interventiedossier. Gezien de specificiteit van bv. een gevangenis of een Seveso-bedrijf kunnen bepaalde parameters op voorhand uitgewerkt worden om zo de reactietijd op het ogenblik van de ramp te kunnen beperken. Voor meer dynamische risico's (bv. een zwaar verkeersongeval of een bomalarm) is dit moeilijker en beperkt men zich tot het opstellen van checklists voor het personeel ter plaatse.

Besluitend kunnen we dus stellen dat de zoektocht naar verkeersplannen en verkeersregelstrategieën bij rampen een zoektocht betekent naar specifieke plannen voor specifieke situaties, opgesteld intern bij de politie en niet expliciet deel uitmakend van de algemene rampenplannen.

2.2.3 Huidige praktijk

Onvoorspelbaar karakter van rampen

Zoals reeds vermeld is het onverwachte karakter kenmerkend voor een ramp. Een ramp kan zich eender waar en eender wanneer voordoen. Het is dus moeilijk om gedetailleerde plannen uit te werken voor verschillende scenario's. Daarenboven dient de verkeersafwikkeling in elk geval apart bekeken te worden op het moment zelf, rekening houden met o.a. de windrichting (giftige gaswolken), de risico's voor het doorgaand verkeer en bv. wegenwerken waardoor bepaalde routes niet gebruikt kunnen worden.

Men vindt het daarom inefficiënt voorafgaandelijk een draaiboek op te stellen. Indien er zich dan daadwerkelijk een ramp voordoet valt men wel terug op een aantal algemene principes die de politie steeds hanteert bij alle mogelijke situaties, bv. ook bij betogingen of geplande evenementen. Eén van die principes is het instellen van een aantal perimeters om het beschouwde (ramp)gebied te zonereren, wat wordt besproken in een volgend puntje.

Als gevolg van deze redenering zijn er dus weinig concrete verkeersregelplannen uitgewerkt. Voor een aantal gekende risicoplaatsen, voornamelijk dan enkele Seveso-bedrijven, heeft men wel reeds de situatie bestudeerd en de te nemen maatregelen vastgesteld. Een voorbeeld van dergelijk verkeersplan voor een Seveso-bedrijf wordt verder in de tekst beschreven. Maar vooraleer over te gaan tot de bespreking van een aantal bestaande concrete plannen, behandelen we het steeds toepasbare principe van de zonering van het rampterrein.

Zonering van het rampterrein

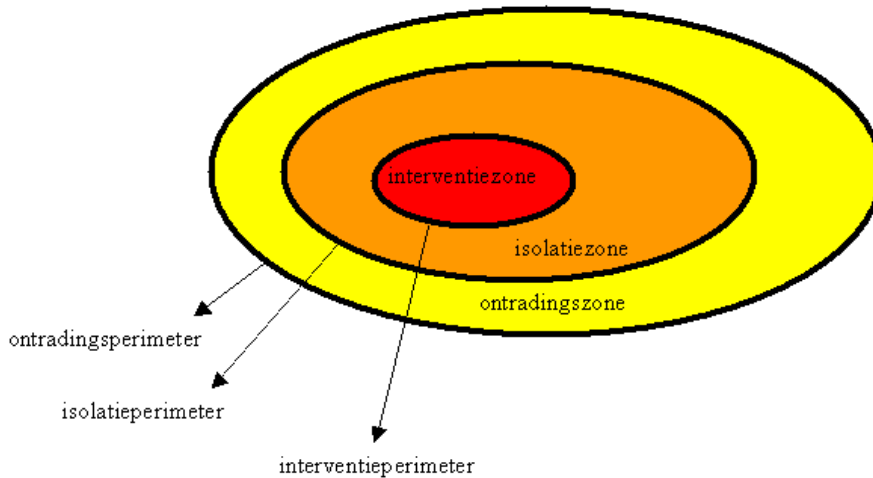
Een algemeen principe dat door de politiediensten in allerhande situaties gehanteerd wordt, is het instellen van perimeters. In dit geval gaat het dus om perimeters rondom de plaats waar de ramp zich heeft voorgedaan.

Bij elke rampspoedige gebeurtenis bestaat de nood om het werkterrein van de hulpdiensten af te bakenen. Deze afbakening zal immers de veiligheid waarborgen van de bij de ramp betrokken personen, de plaatselijke bevolking en van het personeel van de hulpdiensten. Dankzij de afbakening kan de toegang tot het getroffen gebied beter geregeld worden en wordt de coördinatie en samenwerking tussen de verschillende hulpdiensten vergemakkelijkt. Om al deze doelstellingen nog beter te realiseren wordt het rampterrein ingedeeld in een aantal zones, rekening houdend met het gevaarsniveau. De ligging van de perimeters die de verschillende zones afbakenen, wordt bepaald door de Commandopost Operaties en het Coördinatiecomité. De zones waarvan sprake zijn (Federale Overheidsdienst Binnenlandse Zaken, 2004):

- **Interventiezone:** Deze zone, begrensd door de interventieperimeter, is het gebied waar zeer groot gevaar voor de hulpdiensten aanwezig is of kan verwacht worden. Ze is exclusief voorbehouden aan de brandweerdiensten, operationele eenheden van de civiele bescherming of gespecialiseerde diensten, met aangepaste kledij en uitrusting. Twee types instructies kunnen gegeven worden: ofwel worden de werknemers en de bevolking uit deze zone geëvacueerd, ofwel worden er specifieke richtlijnen (bv. sluiten van deuren en ramen) uitgevaardigd i.f.v. de situatie. De interventiezone en -perimeter worden soms ook wel de uitsluitingszone en -perimeter genoemd.
- **Isolatiezone:** Deze zone, begrensd door de isolatieperimeter, is het gebied waar hinderlijke effecten aanwezig zijn of kunnen verwacht worden. Deze zone is toegankelijk voor alle hulpdiensten. In principe is deze zone enkel voorbehouden voor de hulpdiensten. Voor bewoners en werknemers van dit gebied worden passende richtlijnen opgesteld.
- **Ontradingszone:** Deze zone, begrensd door de ontradingsperimeter, is het gebied waar geen hinderlijke effecten optreden en waarvan de betreding niet tot onomkeerbare gevolgen voor de gezondheid leidt. Deze zone wordt desalniettemin ontraden aan doorgaand verkeer en ramptoeristen. De bewoners en werknemers genieten vrije toegang.

In de praktijk hanteert men een kleurencode om de verschillende zones aan te duiden. Men spreekt dan respectievelijk van de rode, oranje en gele zone. Schematisch wordt dit alles weergegeven in figuur 2.2.

Het is de taak van discipline 3 (de politie) om de verschillende perimeters te installeren en de verkeersregeling t.h.v. de perimeters te organiseren. De rode zone is volledig afgesloten voor



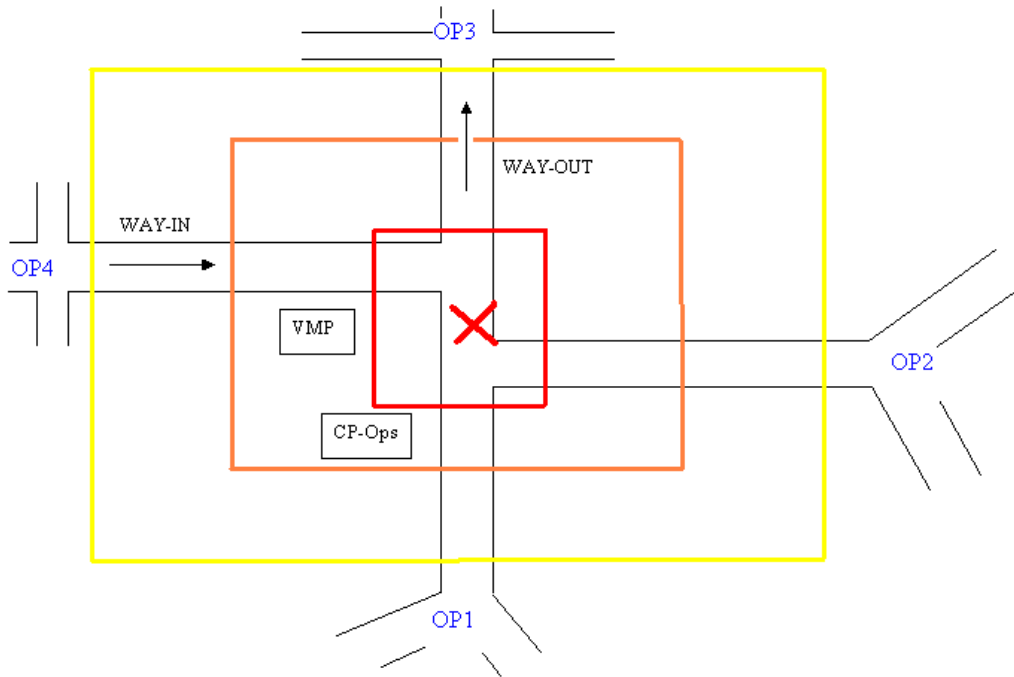
Figuur 2.2: Zonering van het rampterrein: schematisch

alle verkeer. De oranje zone, enkel toegankelijk voor de hulpdiensten, staat onder toezicht. Er wordt verplicht een circulatieplan opgesteld met o.a. de bepaling van de plaats waar de CP-Ops en de VMP (Vooruitgeschoven Medische Post) worden geïnstalleerd en wat de *way-in* en *way-out* is voor de hulpdiensten. Ter hoogte van de ontradingsperimeter tenslotte wordt het verkeer zo goed als mogelijk omgeleid via alternatieve wegen.

Praktisch gaat dit als volgt in zijn werk. De kruispunten die grenzen aan de interventieperimeter (bij de politiediensten ook wel de tactische perimeter genoemd) en de isolatieperimeter worden onmiddellijk ingenomen door politiepersoneel. Hun taak bestaat erin het verkeer dat zich binnen deze perimeters bevindt te ontruimen en het andere verkeer niet meer toe te laten. De ontradingsperimeter wordt ingesteld op het ogenblik dat er voldoende politiepersoneel aanwezig is. Hun taak bestaat er dan in om de gepaste omleidingen te voorzien zodat het doorgaand verkeer weinig hinder van de ramptoestand ondervindt. Een en ander wordt verduidelijkt op figuur 2.3. Om de duidelijkheid te bewaren, zijn op de figuur de politie-eenheden t.h.v. de interventie- en isolatieperimeter niet aangegeven.

Tussen de ontradings- en isolatieperimeter is lokaal verkeer toegelaten. De eenheden OP1 t.e.m. OP4 staan in voor de verkeersgeleiding omheen het rampgebied. Deze staan onderling in verbinding met elkaar via één bevelhebber. Op die manier kan de verkeersgeleiding dan bijgestuurd worden indien nodig.

Het bepalen van de ontradingsperimeters kan in sommige gevallen relatief simpel zijn. Bij een zwaar ongeval waardoor de autosnelweg dient afgesloten, strekt de ontradingszone zich bv. van de opwaarts van het ongeval gelegen afrit tot de volgende oprit. Soms komt er echter



Figuur 2.3: Zonering van het rampterrein: praktisch

heel wat meer bij kijken. Zo is de ontradingsperimeter bij een ramp die gepaard gaat met het vrijkomen van schadelijke gassen afhankelijk van de windrichting. Voor de Seveso-bedrijven kunnen deze perimeters reeds op voorhand bepaald worden, hetgeen in de praktijk ook gedaan wordt.

2.2.4 Bestaande verkeersregelplannen

In deze paragraaf bespreken we een aantal bestaande, concrete verkeersplannen die worden ingeschakeld bij rampsituaties. Op een aantal plaatsen is het zich voordoen van een ramp meer denkbeeldig dan gewoonlijk, denken we maar aan de Seveso-bedrijven.

We starten de bespreking hier dan ook met een verkeersregelplan rond een Seveso-bedrijf. Vervolgens behandelen we het verkeerscirculatieplan van de haven van Antwerpen, waar, bij wijze van spreken, het ene Seveso-bedrijf naast het andere staat.

Seveso-bedrijven politiezone Tessenderlo

In de politiezone Beringen-Ham-Tessenderlo liggen een aantal Seveso-bedrijven, waaronder Tessenderlo Chemie. Voor elk van die bedrijven is een maximale gevarenzone bepaald, aan de hand waarvan de politie verkeersplannen heeft opgesteld die aansluiten op de bestaande rampenplannen (Bens, 2004). Deze verkeersplannen kunnen ingedeeld worden in drie grote delen, nl.:

- het afsluiten van de gevarenzone door politiepersoneel;
- het plaatsen van signalisatie;
- het bepalen van de routes voor het verwittigen van de bevolking.

Geen enkele gevarenzone wordt doorkruist door een grote verkeersas. In het eerste deel van het verkeersplan heeft men zich dan ook beperkt tot het bepalen van de plaatsen die moeten ingenomen worden door politiepersoneel om de instroom in de gevarenzone te verhinderen. Er zijn geen omleidingen voorzien. Ieder personeelslid krijgt een kaart van de omgeving, waarop de gevarenzone staat aangeduid zodat het betrokken personeelslid zelf kan antwoorden op vragen van bestuurders. Bij eerdere oefeningen heeft de politie tellingen laten uitvoeren van het verkeer, waaruit bleek dat het aanwezige personeel deze taak zeker moet kunnen vervullen naast hun taak van verkeersregeling.

In het tweede deel van het verkeersplan wordt bepaald op welke plaatsen signalisatie moet geplaatst worden. Het betreft een aantal invalswegen, alsook elke plaats waar politiepersoneel wordt geposteed. Hierdoor kan dat personeel nog meer tijd vrijmaken voor vragen van bestuurders. Eenmaal alle signalisatie geplaatst kunnen de politiemensen die hiervoor verantwoordelijk zijn ingezet worden voor verkeersregeling buiten de gevarenzone.

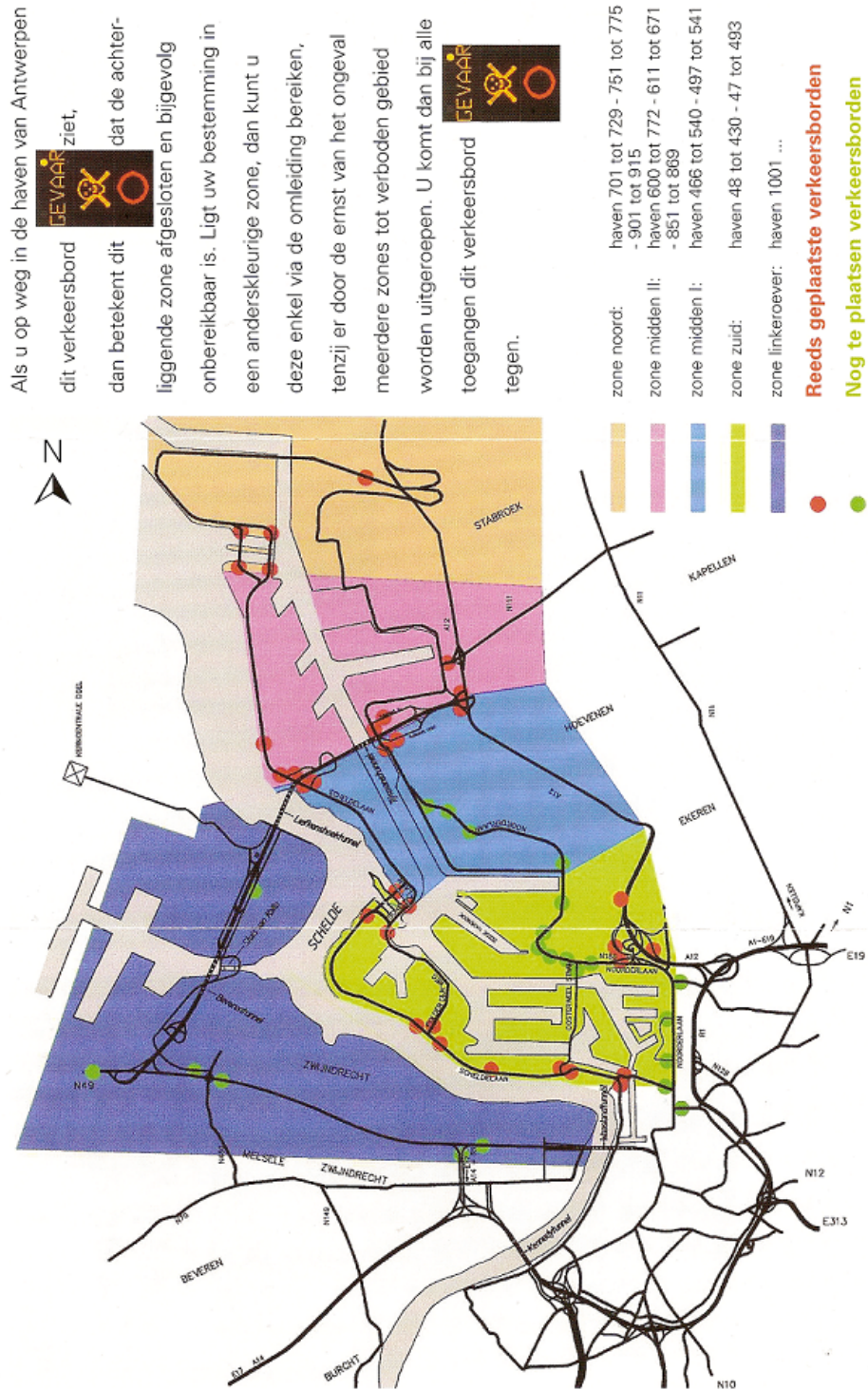
In het derde luik van het plan zijn dan de reiwegen bepaald die moeten gevolgd worden bij het verwittigen van de bevolking om zodoende op een zo kort mogelijke tijd iedereen binnen de gevarenzone op de hoogte te brengen van de te nemen maatregelen.

Evacuatie is in dit verkeersplan niet voorzien en zal naargelang de situatie bekeken worden.

Haven van Antwerpen

Met de aanwezigheid van bedrijven zoals BASF, Bayer, Esso, Solvay, ... is de haven van Antwerpen één van de grootste (petro)chemische sites van Europa. Om bij een ramp tot een vlugge en efficiënte afsluiting te kunnen komen, hebben de politie, de provincie Antwerpen, het Vlaams Gewest en het bedrijfsleven samen een verkeersregelplan opgesteld. Dat verkeersregelplan voorziet in een indeling van het havengebied in zones en een specifieke verkeerssignalisatie en bepaalt de aanrijroutes voor hulpdiensten, de omleidingswegen en de evacuatiewegen.

Aangezien het bij het ontstaan van een rampsituatie (bv. giftige gaswolk), zeker in de beginfase, onmogelijk is te voorzien hoe het gebeuren zal evolueren, kan er kostbare tijd gewonnen worden door de af te sluiten zone zo groot mogelijk te houden. Deze zone wordt dan volledig afgesloten voor inrijdend verkeer. Opdat echter niet elk incident aanleiding zou geven tot het lamleggen van het havengebied, werd dit ingedeeld in vijf zones, zoals te zien op 2.4 (bron: Provincie Antwerpen (2002)).



Figuur 2.4: Zonering in het verkeersplan van de Antwerpse haven



Figuur 2.5: Speciale verkeersborden in de Antwerpse haven

Wanneer er zich een incident voordoet in een bepaalde zone worden de afsluitingen geplaatst en de verkeerssignalisatie in werking gesteld om het verkeer op de kruispunten in de aanpalende zones om te leiden. De verkeerssignalisatie waarvan sprake wordt getoond in figuur 2.5. De inplantingsplaatsen van deze borden zijn aangegeven op figuur 2.4.

Voor elk bedrijf in de haven is dan in het verkeersplan aangegeven op welke kruispunten er moet opgetreden worden en wat de nodige personeelsbezetting is voor die kruispunten, welke signalisatie moet geplaatst worden en in welke stand de speciale verkeersborden moeten gezet worden. Een ramp in de raffinaderij van Total op de Scheldelaan bijvoorbeeld, vergt acties op 18 kruispunten, de inzet van in totaal 24 politiemensen en het aanschakelen van 17 verkeersborden (op 5 van de 18 kruispunten). Eenmaal al deze maatregelen op het terrein zijn geïmplementeerd is de getroffen zone volledig afgesloten en wordt het verkeer omgeleid.

De sturing van de verkeersborden gebeurt vanuit de controlekamer van de lokale politie Antwerpen. Daar krijgt men de melding binnen van een ernstig incident in een bepaald bedrijf. Het hele verkeersplan is geïnformatiseerd, zodat men in de controlekamer enkel het desbetreffende bedrijf moet aanklikken om de gewenste verkeersborden in de gewenste stand te schakelen. Tegelijkertijd wordt dan ook het nodige personeel uitgestuurd.

Wat betreft de aanrijroutes voor de hulpdiensten en de evacuatiewegen worden in het verkeersplan voor de verschillende windrichtingen de te gebruiken wegen opgesomd.

Omleidingsroutes

Andere verkeersregelplannen die ingeschakeld kunnen worden bij een ramp vinden we op het niveau van de autosnelwegen. Voor een aantal autosnelwegen zijn reeds op voorhand voor alle segmenten gepaste omleidingsroutes bepaald. Wanneer (een deel van) een autosnelweg dient afgesloten t.g.v. een zwaar ongeval op of een ramp in de nabijheid van de autosnelweg, liggen de gepaste omleidingsplannen klaar. Dit concept wordt reeds toegepast in landen zoals Nederland, Duitsland, Frankrijk, enz. Deze omleidingsroutes worden ook wel calamiteitenroutes genoemd (zie verder paragraaf 4.2.2).

Het is de bedoeling van de wegbeheerder om op termijn voor alle autosnelwegen in Vlaanderen zulke omleidingsplannen te ontwikkelen. In de provincie Oost-Vlaanderen is dit reeds het geval.

Voor de grote ring rond Brussel beschikt men over een actieplan, genaamd “Ring Rood”. Dit bevat plannen voor alternatieve routes wanneer een gedeelte van de ring is afgesloten. Alle betrokken diensten, voornamelijk de politie, uit de omgeving van de ring worden verwittigd. Aan de hand van een bepaald codenummer dat wordt doorgegeven weten al deze betrokken partijen onmiddellijk welke de toe te passen omleiding is, wat hen te doen staat, welke signalisatie nodig is, enz. (De Ceuster, 2003, p. 21)

Ook voor het gebied rond de stad Antwerpen liggen een aantal scenario’s klaar. Van groot nut daar is het monitoren van het verkeer op de verschillende autosnelwegen door het Vlaams Verkeerscentrum : op basis van de, m.b.v. langs de autosnelwegen geplaatste camera’s, waargenomen verkeersstromen kunnen de plannen al of niet bijgestuurd worden. Er wordt gebruik gemaakt van een aantal *Intelligent Transportation System*-technologieën, zoals *Closed Circuit Television Cameras*, *Automatic Incident Detection Cameras* en *Variable Message Signs*. Dit zijn technologieën die vooral werden geïnstalleerd voor het alledaagse verkeers- en incident management, maar die dus ook erg nuttig kunnen zijn in uitzonderlijke situaties. Daar in de Verenigde Staten op grote schaal van deze en talrijke andere ITS-technologieën wordt gebruik gemaakt, worden deze uitgebreid besproken in het hoofdstuk over de Verenigde Staten, meer bepaald in paragraaf 3.3.2.

2.3 Besluit

Uit dit hoofdstuk kunnen we concluderen dat het in België eerder uitzonderlijk is om concrete verkeersregelplannen uit te werken voor eventuele rampen. De hier besproken voorbeelden zoals het verkeersregelplan voor de haven van Antwerpen zijn de uitzonderingen die deze regel bevestigen. In de meeste gevallen rekent men op de terreinkennis van het personeel en steunt men op de praktijk van het zoneren van het rampterrein, wat reeds zijn degelijkheid heeft bewezen. In de planvorming is het regelen van het verkeer dus zeker niet als prioritair

te bestempelen. In de gevallen waar toch plannen werden opgesteld, wordt vooral gekeken naar de verkeersafwikkeling en -regeling bij rampen en niet zozeer bij de eventueel ermee gepaard gaande evacuaties. Een extreem grote verkeersvraag wordt m.a.w. niet beschouwd bij het opstellen van de verkeersregelplannen. Toch is het in zulke gevallen pas echt enorm belangrijk een relatief vlotte verkeersafwikkeling te bewerkstelligen.

Hoofdstuk 3

Verkeersmanagement bij evacuaties: USA

Uit het vorige hoofdstuk onthouden we het ontbreken van uitgewerkte evacuatieplannen in België. Het blijkt dat in de Verenigde Staten van Amerika daarentegen wél heel wat plannen en maatregelen bestaan om enigszins een antwoord te kunnen bieden op de enorme verkeersvraag bij massale evacuaties. In dit hoofdstuk bespreken we dan ook de Amerikaanse state-of-the-practice, waarbij we ons beperken tot evacuaties. We behandelen dus niet het verkeersmanagement bij rampen in het algemeen, zoals in het vorige hoofdstuk.

3.1 Inleiding

Het hoeft niet te verbazen dat er in de Verenigde Staten heel wat gedetailleerde plannen zijn uitgewerkt voor grootschalige evacuaties. De gebieden aan zowel de oost- als westkust worden immers regelmatig geconfronteerd met sterke tropische stormen, die soms een evacuatie noodzakelijk maken. Afhankelijk van de plaats waar deze tropische stormen zich ontwikkelen worden ze *hurricanes*, *typhoons* of *cyclones* genoemd. In deze thesis spreken we gemakshalve over orkanen. Jaarlijks bereiken gemiddeld gezien over de laatste 50 jaar een vijftal orkanen de kustgebieden, waaronder gemiddeld twee orkanen als *major hurricanes* bestempeld worden. Dit zijn de orkanen die tot de drie zwaarste van in totaal vijf categorieën behoren (Baxter, 2001). Bovenop het feit dat deze gebieden frequent geconfronteerd worden met zulke noodsituaties, stelt men vast dat ze gedurende de laatste tientallen jaren een enorme bevolkingsgroei en expansie van de toerismesector hebben gekend (Wholson & Meehan, 2003). Eventuele evacuaties zullen dus sneller betrekking hebben op een groot aantal personen. Zo moesten er in 1999 in de staten Florida, Georgia, North Carolina en South Carolina ruim 3 miljoen mensen geëvacueerd worden voor orkaan Floyd.

Het is dus duidelijk dat in deze gebieden een grote nood bestaat aan degelijk uitgewerk-

te evacuatieplannen en dat er ook reeds heel wat ervaring is opgedaan op het gebied van verkeersmanagement (d.i. het volgens bepaalde doelen, strategieën en tactieken inzetten van maatregelen die de verkeersafwikkeling binnen bepaalde randvoorwaarden optimaliseren) bij grootschalige evacuaties. Omdat men in de Verenigde Staten zo ver gevorderd is, geven we hier op basis van een literatuurstudie een overzicht van de opgedane ervaring en de huidige praktijken. Het gaat hier wel enkel om de evacuaties bij orkanen en dus over een in zekere mate voorspelbaar fenomeen.

Eerst bespreken we enkele algemene zaken i.v.m. evacuaties, die dan als achtergrond dienen bij de bespreking van meer specifiek verkeersgerelateerde zaken. In vergelijking met het vorige hoofdstuk concentreren we ons zoals gezegd veel meer op evacuaties, juist omdat men in de Verenigde Staten op dat gebied ver gevorderd is.

3.2 Algemene zaken

3.2.1 Beleid en rampen- en evacuatieplannen

De structuur waarbinnen in de Verenigde Staten de rampenplannen met eventueel bijhorende evacuatieplannen worden opgesteld is gelijkaardig aan de Belgische. De federale overheid verplicht de regionale overheden om rampenplannen (*emergency operations plans* of *emergency management plans*) uit te werken. De federale staat wordt vertegenwoordigd door het *Federal Emergency Management Agency (FEMA)*, onderdeel van het na de aanslagen van 11 september 2001 opgerichte *Department of Homeland Security*. De regionale overheden zijn dan de verschillende staten. De meeste staten volgen een aanpak op twee niveaus: de rampenplannen worden gedetailleerd uitgewerkt op en door het lokale niveau (*city* of *county*), terwijl de staat, via de *state-level Emergency Management Agencies*, een coördinerende rol speelt en de plannen uitwerkt voor bv. grootschalige evacuaties die het grondgebied van een stad of gemeente overstijgen.

Tot voor enkele jaren was evacuatieplanning uitsluitend de verantwoordelijkheid van de *emergency management agencies* en van de politie (*law enforcement*). De bijdrage van de *transportation agencies*, dit zijn de overheidsdiensten die zich specifiek met verkeer en transport bezighouden, tot het uitwerken van de evacuatieplannen was slechts zeer beperkt. Sinds een aantal jaren beseft men echter dat hierin verandering moet komen. Twee recente grootschalige evacuaties, orkaan Georges in 1998 en orkaan Floyd in 1999, gingen immers gepaard met gigantische verkeersproblemen. Er werden reistijden genoteerd die 8 tot 9 maal de normale reistijd bedroegen. Dit heeft duidelijk gemaakt dat men op zulke scenario's niet voldoende voorbereid was. Sindsdien erkent men dat er nood is aan een verhoogde inbreng van de personen en diensten die zich voltijds bezighouden met verkeersmanagement e.d. Het is on-

dertussen zo dat in alle staten nabij de kust de state departments of transportation actief meewerken om de evacuaties beter te plannen en uit te voeren. Ook op het federale niveau werken ondertussen de *Federal Highway Administration (FHWA)* en het *Federal Emergency Management Agency* samen i.v.m. deze problematiek.

3.2.2 Commandostructuur

Wat betreft de commandostructuur bij het uitvoeren van evacuaties is het van belang te weten wie de verantwoordelijkheid en de autoriteit heeft een evacuatie af te kondigen. Dit verschilt van staat tot staat. Wettelijk gezien ligt de autoriteit bij de gouverneurs van elke staat, maar in praktijk hebben de gouverneurs deze bevoegdheid gedelegeerd naar lokale bestuurders zoals bv. burgemeesters. Op hun beurt laten deze lokale bestuurders hun beslissing om al dan niet te evacueren afhangen van wat hen geadviseerd wordt door *emergency managers* van het lokale *emergency management agency*. Er zijn twee redenen waarom de gouverneur zijn bevoegdheid doorspeelt. Vooreerst kan men er van uitgaan dat de lokale besturen de plaatselijke situatie beter kunnen inschatten. Ten tweede is het echter ook zo dat politiek gezien het afkondigen van een evacuatie gevoelig ligt: een evacuatie afkondigen die achteraf onnodig bleek, betekent immers een enorme economische schade die de gouverneur kan worden aangewreven.

3.2.3 Wanneer evacuatie bevelen?

Het tijdstip waarop een evacuatie afgekondigd wordt, is cruciaal. Hoe vroeger men beslist over te gaan tot het evacueren van de bevolking, hoe meer tijd de bevolking zal hebben om het gebied te verlaten en hoe vlotter de evacuatie kan verlopen. Echter, de kans dat de evacuatie achteraf onnodig blijkt, bv. door een koerswijziging van de orkaan, neemt eveneens toe. Het is mogelijk dat een koerswijziging van de orkaan het gebied gaat bedreigen waarheen de geëvacueerden gevlucht waren. Een onnodige evacuatie betekent daarenboven een grote economische kost en beïnvloedt bovendien het gedrag van de mensen bij volgende evacuaties. Men spreekt op dit vlak over het “*crying wolf*”-syndroom: bij een volgende dreiging zullen de mensen veel minder geneigd om de evacuatierichtlijnen op te volgen.

De beslissing om al of niet te evacueren voor een dreigende orkaan is voornamelijk gebaseerd op de weersvoorspelling. Informatie betreffende de weersvoorspellingen wordt gegeven door de *National Weather Service (NWS)* en door het *National Hurricane Center (NHC)* (Hullett, 1999, p. 242-243). De verspreiding van deze informatie gebeurt o.a. via *NOAA Weather Radio (National Oceanic and Atmospheric Administration Weather Radio)* en via het *Emergency Managers Weather Information Network (EMWIN)*. Verder zijn er in deze context een aantal modellen ontwikkeld. Zo geeft het SLOSH-model (*Sea, Lake and Overland Surges from Hurricanes*), ontwikkeld door de NWS, een schatting voor de te verwachten golfhoogtes (storm surges) t.g.v. de naderende orkaan.

Ter ondersteuning van de beslissing om al of niet te evacueren, is heel wat software ontwikkeld. Eén van de talrijke voorbeelden is HURREVAC (HURRricane EVACuation program). Dit programma maakt voortdurend een update van de meetgegevens en de weersvoorspellingen en bepaalt het te verwachten traject van de orkaan, dat dan op verschillende manieren grafisch wordt weergegeven. Op basis daarvan geeft het programma o.a. de te verwachten windsnelheden, de kans dat de orkaan een bepaalde plaats zal bereiken en binnen hoeveel tijd dat zal gebeuren (Sea Island Software, 2004). Rekening houdend met o.a. data van vorige evacuaties wordt daarenboven de benodigde tijd voor het evacueren van de verschillende gebieden bepaald, zodat men kan inschatten of een evacuatie zich opdringt of niet.

3.2.4 Evacuatietypes

Eenmaal de beslissing genomen om over te gaan tot evacuatie, dient de omvang en het type van de evacuatie nog bepaald te worden, afhankelijk van karakteristieken van de storm en de bedreigde zone. In de meeste staten kent men drie types evacuaties (Urbina & Wolshon, 2003): *voluntary*, *recommended* en *mandatory* (vrijwillig, aanbevolen, verplicht). De vrijwillige evacuaties zijn bedoeld voor diegenen die het grootste risico lopen, zoals eilandbewoners of mensen die offshore werken. De mensen zijn volledig vrij al of niet te evacueren en er worden geen verkeersmaatregelen getroffen. Hetzelfde geldt eigenlijk voor de aanbevolen evacuaties. De doelgroep is weliswaar omvangrijker en eventueel worden toch een beperkt aantal verkeersmaatregelen getroffen. Bij de verplichte evacuaties daarentegen treden alle verkeersplannen in werking en wordt er zoveel mogelijk druk uitgeoefend op de bevolking om hun woning te verlaten. Ook al spreekt men van verplichte evacuaties, toch kan men in nagenoeg geen enkele staat iemand fysiek dwingen zijn huis te verlaten.

Welk type evacuatie afgekondigd wordt, heeft zeker zijn belang. Het type evacuatie beïnvloedt immers in belangrijke mate de persoonlijke beslissing van mensen om al of niet gevolg te geven aan de evacuatieoproep. Hieruit zou men verkeerdelijk kunnen besluiten dat men beter sowieso een verplichte evacuatie afkondigt teneinde een maximale respons te verkrijgen. Dit verhoogt echter de omvang van de zogenaamde *shadow evacuations*: bewoners van naburige gebieden die niet bedreigd worden en toch evacueren. Deze schaduwevacuaties bemoeilijken dan de evacuatie van zij die daadwerkelijk moeten evacueren.

3.2.5 Informatieverspreiding naar de bevolking toe

Een positieve respons op evacuatieoproepen en -richtlijnen (bv. het volgen van de aangegeven evacuatieroutes) is essentieel voor een succesvolle en efficiënte evacuatie. Daarom is het van belang enerzijds de mensen bewust te maken van de mogelijke gevaren die zich kunnen voordoen bij een orkaan en anderzijds hen duidelijk te informeren over wat hen te doen staat

in zulke situaties. Vóór het begin van het orkaanseizoen herinneren diverse *public awareness campaigns* de mensen eraan zich hierop voor te bereiden. Eenmaal een orkaan daadwerkelijk nadert, wordt de bevolking via allerlei kanalen gewaarschuwd. Zo kan men gebruik maken van het *Emergency Alert System*, dat de normale radio- en televisieprogramma's onderbreekt voor een evacuatieoproep en bijhorende richtlijnen. Uit gedragsstudies blijkt trouwens dat het uitzenden van beelden van de opgelopen schade bij vorige orkanen net voor het verspreiden van de evacuatieoproep een zeer gunstig effect heeft op het opvolgen van die oproep.

De laatste jaren is rol van het internet als kanaal bij de informatieverspreiding gevoelig belangrijker geworden. Zowat alle staten publiceren de aangewezen evacuatieroutes op het web, samen met andere informatie zoals real-time weersgesteldheid, real-time verkeerstoestand, schuilplaatsen en hotels, checklists, beschermingsmaatregelen voor woningen en bedrijven, enz. Een mooi voorbeeld hiervan is <http://www.floridadisaster.org>.

3.3 Verkeersgerelateerde zaken

In deze paragraaf bespreken we eerst de meest recente praktijken die gebruikt worden bij het regelen van het verkeer bij evacuaties, nl. het toepassen van *contraflow* en het gebruik van *ITS (Intelligent Transportation Systems)* in evacuatiesituaties. Dit zijn twee voorbeelden van de inbreng van de *transportation departments*, die, zoals reeds gezegd, nog maar een aantal jaren als volwaardige speler betrokken worden bij de evacuatieplanning. Het spreekt dan ook voor zich dat we bij deze twee toepassingen uitgebreid zullen stilstaan. Daarna wordt nog kort aandacht besteed aan o.a het inzetten van het openbaar vervoer voor personen met beperkte mobiliteit en het voorkomen van problemen t.g.v. wegenwerken op de evacuatieroutes.

3.3.1 Contraflow

Tijdens evacuaties zal het verkeer dat het bedreigde gebied verlaat hoogstwaarschijnlijk met congestie af te rekenen krijgen, terwijl er op de wegen die naar het gebied toe leiden nagenoeg geen verkeer te noteren valt. Deze vaststelling leidt vrijwel onmiddellijk tot de idee om het tekort aan capaciteit voor het evacuerend verkeer op te vangen door de rijrichting op (een deel van) de inwaarts gerichte wegen om te wisselen. Het omdraaien van de verkeersstroom op één of meer rijstroken van de inkomende autosnelwegen met als doel de uitgaande capaciteit te verhogen noemt men "tegenstroom", in de Engelstalige literatuur spreekt men van *contraflow*, *reverse laning*, *lane reversals* of *one-way-out*. In deze thesis gebruiken we de veruit meest gebruikte term, nl. *contraflow*.

Het concept van *contraflow* is niet volledig nieuw. In heel wat steden over de hele wereld hanteert men dit principe om tijdens de ochtend- en avondspits de capaciteit beter te laten beantwoorden aan de verkeersvraag. In dit kader spreekt men dan wel eerder over *tidal flow*,

om aan te geven dat er dagelijks twee maal van rijrichting gewisseld wordt. Ook bij grote evenementen zoals sportwedstrijden wordt deze methode wel eens toegepast.

Men mag echter niet zomaar veronderstellen dat de efficiëntie, m.a.w. de effectieve toename van de capaciteit, van een contraflow-operatie bij evacuaties even groot zal zijn als deze bij de dagelijkse wisselingen van rijrichting. Met deze laatste zijn de automobilisten immers snel vertrouwd, terwijl er bij evacuaties heel wat onzekerheid kan ontstaan bij de automobilisten. Hoe dan ook, sinds de enorme verkeersproblemen tijdens de orkaan Floyd zijn heel wat staten in de kustgebieden intensief begonnen met de uitwerking van plannen voor het toepassen van contraflow bij toekomstige evacuaties. De staat Florida springt hierbij het meest in het oog: op verschillende segmenten van de verschillende autosnelwegen zijn er in totaal voor maar liefst 1200 km contraflow-plannen voorzien (Urbina, 2002, p. 72).

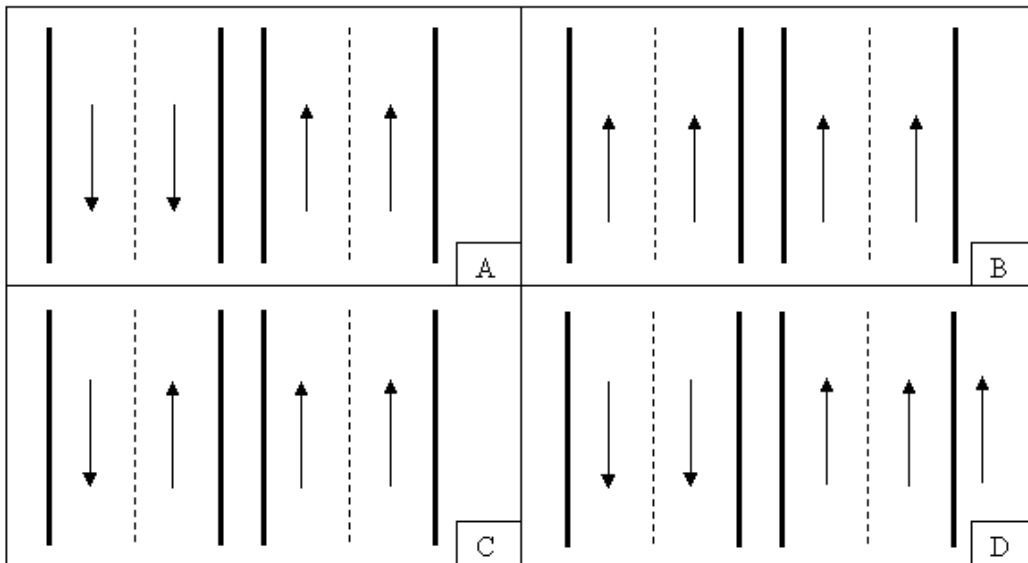
We bespreken hier achtereenvolgens de mogelijke vormen waarin contraflow kan worden toegepast en het ontwerp van het begin- en eindpunt waar de contraflow start/eindigt. Tot slot worden dan nog kort enkele andere aandachtspunten aangehaald.

Mogelijke vormen van contraflow

Er zijn een aantal mogelijke typestrategieën toe te passen bij contraflow. Elk van deze mogelijkheden heeft zijn specifieke implicaties wat betreft kosten, veiligheid en bereikte capaciteitstoename.

In figuur 3.1 wordt in vakje A de normale toestand op een autosnelweg getoond met, om de figuur overzichtelijk te houden, slechts 2x2 rijstroken. Veruit de meest gebruikte strategie is deze waarbij **alle rijstroken** van de inwaartse snelweg van rijrichting wisselen (mogelijkheid B). In dit scenario moet er op toegekeken worden dat de nodige opritten worden afgesloten, hetgeen een extensieve inzet vergt van personeel. Ook moet men personeel inzetten om zich ervan te vergewissen dat al het inkomende verkeer de autosnelweg heeft verlaten, vooraleer het evacuerende verkeer kan toegelaten worden. Deze strategie verdient de voorkeur wegens zijn hoge graad van veiligheid.

Men zou er ook voor kunnen opteren om slechts een **beperkt aantal rijstroken** van de inwaartse rijrichting te gebruiken voor uitgaand verkeer (mogelijkheid C). Deze strategie vereist de plaatsing van kegeltjes of barricades tussen de rijstroken met verschillende rijrichting. Dit vergt eveneens een aanzienlijke inzet aan personeel en daarenboven kan er niet gegarandeerd worden dat alle automobilisten zich gaan houden aan de nieuwe regeling. De kans op een kop-op-kop-ongeval is dus reëel. Deze strategie wordt dan ook algemeen beschouwd als zeer onveilig en wordt daarom niet toegepast. Eventueel kan men wel één enkele inwaartse rijstrook behouden enkel en alleen voor de hulpdiensten die het bedreigde gebied in moeten. Een andere manier om de capaciteit te verhogen voor het uitgaande verkeer, zij het dat deze strikt genomen niet onder de noemer contraflow valt, is het toelaten van **verkeer op de pechstrook** (mogelijkheid D). Opdat dit überhaupt mogelijk zou zijn, moet de staat van het



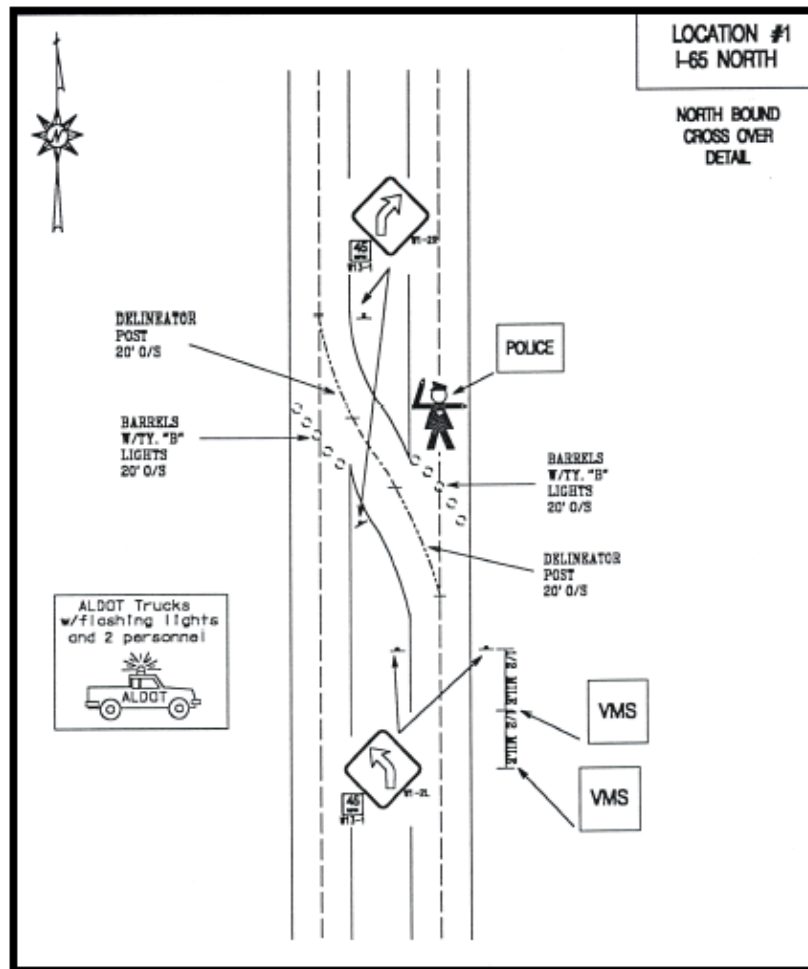
Figuur 3.1: Mogelijke vormen van contraflow

wegdek op de pechstrook goed zijn en moet de doorgang onder de bruggen voldoende breed zijn. Eén enkele brug met een onvoldoende brede doorgang kan er voor zorgen dat het geen zin heeft om het verkeer op de pechstrook toe te laten.

Wat is nu de te verwachten toename van de capaciteit voor deze verschillende mogelijkheden? In een verkeersstudie uit 2000, één van de weinige studies waarin dit onderzocht wordt, PBS&J (2000, p. 66) wordt deze vraag beantwoord voor het geval van twee rijstroken per rijrichting. Het omwisselen van rijrichting op één van de twee inwaartse rijstroken levert een capaciteitstoename op van 33%, indien alle rijstroken gebruikt worden voor het evacuerend verkeer stijgt de capaciteit met 70%. Het gebruik van een pechstrook zou een capaciteitstoename van ongeveer 10% met zich meebrengen. We merken hier nogmaals op dat men bij een massale evacuatie niet mag rekenen op de volledige capaciteit van de weg in normale omstandigheden. Zo rekent men in voormelde studie met een capaciteit per rijstrook van 1500 vtg/u i.p.v. de ‘normale’ 2000 vtg/u.

Ontwerp begin- en eindpunt

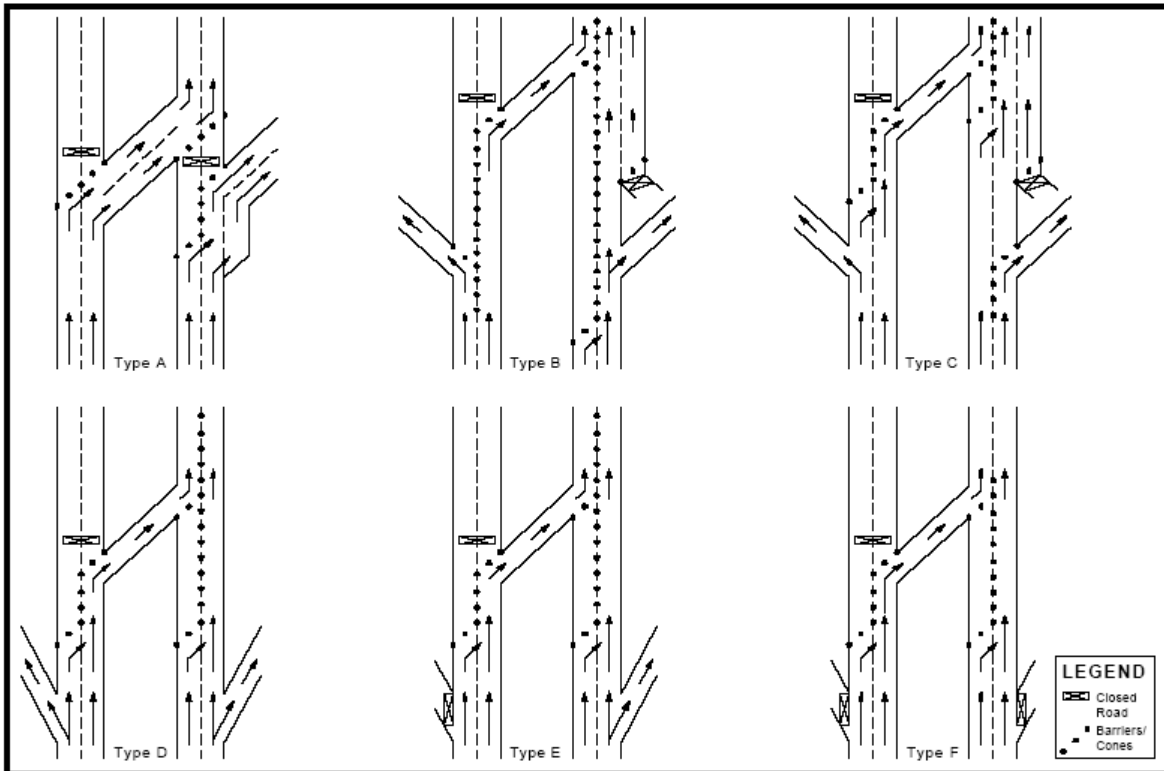
Naast de keuze van het type contraflow dat men wenst toe te passen, moet er ook grondig bestudeerd worden hoe de punten worden ingericht waar het contraflow-regime start en eindigt. Hiervoor zijn er geen algemene regels of standaarden beschikbaar, waardoor er heel wat verschillen te noteren vallen tussen de verschillende staten. Nochtans tonen de resultaten van een recent onderzoek (Theodoulou & Wolshon, 2004) aan dat een goede planning en een goed ontwerp van de beginpunten kritiek zijn voor het effectief zijn van contraflow.



Figuur 3.2: Mogelijk ontwerp voor beginpunt van contraflow

Om een deel van het evacuerende verkeer naar de vakken van de tegengestelde rijrichting te verplaatsen (beginpunt), maakt men in veruit de meeste gevallen gebruik van een *median crossover*, dit is een verharde doorgang doorheen de middenberm. Afhankelijk van situatie tot situatie dwingt men dan alle uitgaande verkeer op de andere rijrichting en 'vult' men de uitwaarts gerichte rijstroken met het verkeer dat de autosnelweg oprijdt op volgende opritten. Een voorbeeld van dergelijk plan wordt getoond in figuur 3.2 (bron: Urbina (2002, p. 78). Men kan er echter ook voor opteren om het verkeer van slechts één rijstrook af te buigen.

Naarmate men zich verder verwijderd van het bedreigde gebied, neemt de intensiteit van het evacuerende verkeer af. Op de plaats waar deze intensiteit voldoende is afgenomen, kan men alle uitgaande verkeer terug op de uitgaande rijstroken plaatsen (eindpunt). Voor de uitwerking van dit eindpunt kan men al of niet gebruik maken van een *median crossover*.



Figuur 3.3: Mogelijke ontwerpen voor eindpunt van contraflow

Wanneer men inderdaad gebruik maakt van dergelijke doorsteek doorheen de middenberm, zijn er nog talrijke varianten mogelijk. In figuur 3.3 (bron: Lim (2003)) worden deze schematisch weergegeven. De verschillende aangegeven types onderscheiden zich van mekaar door het al of niet toelaten of verplichten om de snelweg te verlaten en gebruik te maken van het secundaire wegennet. Behoudens type F, waar heel wat congestie te verwachten valt, worden alle types in de praktijk toegepast. Welk type juist wordt toegepast hangt af van de precieze locatie en omstandigheden.

Wanneer men geen median crossover kan of wil implementeren, zal men het evacuerend verkeer op de inwaarts gerichte rijstroken verplichten de autosnelweg te verlaten en zijn reis verder te zetten op het onderliggende wegennet. Tenslotte merken we nog op dat dit verkeer de autosnelweg zal moeten verlaten langs een oprit waarop de rijrichting werd omgedraaid.

Begrijpbaarheid voor automobilisten

Er moet voor gezorgd worden dat de verwarring bij automobilisten, die er sowieso zal heersen bij het toepassen van contraflow, beperkt blijft. Hoe meer verwarring er heerst, hoe lager de snelheid zal liggen en hoe kleiner de capaciteitstoename zal zijn. Daarenboven verhoogt de kans op ongevallen. Daarom is het noodzakelijk dat de automobilisten degelijk geïnformeerd worden, zowel vóór als tijdens de evacuatie. In het gedeelte over ITS (paragraaf

3.3.2 wordt hier verder op ingegaan. Om de verwarring te beperken moet eveneens in adequate verkeerssignalisatie (en eventueel wegmarkeringen) voorzien worden voor het verkeer op de contraflow-stroken.

Kostprijs

De kostprijs van een contraflow-operatie is zeer gering in vergelijking met het aanleggen van één of meerdere rijstroken om eenzelfde capaciteitstoename te bekomen. Toch brengt dergelijke operatie een zekere kost met zich mee. Er moet namelijk heel wat personeel ingezet worden en er moet geïnvesteerd worden in allerlei ITS-technologieën (zie verder). Deze laatste investeringen zijn echter ook nuttig voor het verkeersmanagement in gewone omstandigheden.

Wanneer starten en eindigen met contraflow?

Uit het voorgaande blijkt duidelijk dat er heel wat tijd nodig is vooraleer het verkeer daadwerkelijk kan verplaatst worden naar andere rijstroken. Afhankelijk van de lengte van het segment waarop contraflow zal worden toegepast, rekent men een implementatietijd in van vier tot twaalf uur. De beslissing om contraflow toe te passen hangt voornamelijk af van de huidige en de voorspelde weersomstandigheden. Verder staat men in een aantal staten weigerachtig tegenover een implementatie van contraflow tijdens de nacht wegens de beperkte zichtbaarheid voor zowel automobilisten als personeel. Met al deze factoren houdt men rekening bij het tijdstip waarop men beslist te starten met contraflow.

Voor het beëindigen van contraflow gelden er in de meeste staten twee criteria: de afname in verkeersvolume en het tijdstip waarop de storm orkaankracht haalt. Primaire eis is dat op het ogenblik dat de orkaan het land bereikt heeft, de mensen zich reeds in schuilplaatsen bevinden en niet meer op de weg.

3.3.2 Intelligent Transportation Systems

Naast de nood om de capaciteit van de verkeersnetwerk te verhogen bij evacuaties, is er minstens even grote nood aan het verzamelen van real-time verkeersinformatie allerhande en deze in de gepaste vorm te verspreiden zowel naar de beheerders van het evacuatieproces (de *emergency managers*) als naar de bevolking toe.

Daar de beslissingen van de beheerders i.v.m. het instellen van contraflow, het aanwijzen van alternatieve routes, het afsluiten van bepaalde wegen, enz. gebaseerd zijn op de informatie over de verkeersafwikkeling, en dan voornamelijk de verkeersvolumes en de snelheden, is het van groot belang dat de beheerders over recente en correcte data beschikken. Om de evacués zo goed mogelijk bij hun reis te begeleiden, moeten zij op hun beurt geïnformeerd worden over congesties, reistijden, weerstoestanden, incidenten en beschikbaarheid van alternatieve routes.

Om deze behoefte in te vullen, maken de meeste staten intensief gebruik van ITS, Intelligent Transportation Systems. De essentie van ITS is het geïntegreerde gebruik van (informatie)technologieën (hardware, software, communicatietechnologie, elektronica, . . .) met als doel de veiligheid en de efficiëntie van de verkeersafwikkeling te bevorderen. Heel wat staten beschikken reeds over een aantal *Intelligent Transportation Systems* voor het “alledaagse” verkeersmanagement. De verscheidenheid aan ITS is zo groot, dat ITS America¹, om de compatibiliteit en de samenwerking tussen de verschillende systemen te garanderen, een algemene structuur of raamwerk heeft uitgewerkt: de *National ITS Architecture*. Hierop kunnen de staten zich dan baseren om hun eigen ITS te ontwikkelen en te implementeren.

We geven nu een overzicht van welke technologieën beschikbaar zijn en toepasbaar zijn bij evacuaties. De meeste zijn pas kosteneffectief indien ze eveneens kunnen ingezet worden bij het alledaagse verkeersmanagement.

We starten het overzicht met technologieën voor het verzamelen van informatie, vervolgens voor het verspreiden van informatie. Daarna komen een aantal mogelijkheden voor het verkeersmanagement op het niveau van de autosnelwegen aan bod (*freeway control*). Op het niveau van de secundaire wegen behandelen we de verkeerslichtenregeling die op een *intelligente* manier kan worden aangestuurd. Na het formuleren van een aantal algemene opmerkingen beëindigen we deze paragraaf met een besluit.

Verzamelen van informatie

Zoals vermeld is het van cruciaal belang voor de *emergency managers* om over betrouwbare en accurate gegevens over de toestand in het ganse verkeersnetwerk te beschikken. Om die informatie nu te verzamelen kan men gebruik maken van:

- **Detectiesystemen:** deze verzamelen verschillende verkeersparameters zoals de bezettingsgraad van de weg, het verkeersvolume of de verkeersintensiteit, de voertuigclassificatie, de lengte van wachtrijen en de snelheid. Hiervoor kunnen elektromagnetische lussen in het wegdek en technologieën die werken op basis van elektromagnetische, akoestische of ultrasone golven gebruikt worden.
- **Videocamera’s:** men spreekt over *Closed Circuit Television (CCTV) Cameras*. De meeste videocamera’s kunnen draaien en inzoomen en werken ook bij duisternis. De camera’s worden geplaatst op voor het evacuatieproces cruciale plaatsen in het netwerk zoals kruispunten of opritten. Daar is het immers van groot belang de verkeerstoestand correct in te schatten, hetgeen niet altijd mogelijk is enkel op basis van detectiesystemen.

¹een non-profit organisatie, in 1991 opgericht om de ontwikkeling van ITS in de Verenigde Staten te coördineren. Leden zijn o.a. federale, regionale en lokale overheden, bedrijven en universiteiten.

Nog een stap verder gaan de *Automatic Incident Detection (AID) Cameras*, ook wel *Automatic Collision Detection (ACD) Cameras* genoemd. Dit zijn vaste camera's die automatisch incidenten, zoals ongevallen en stilstaande voertuigen, detecteren en er automatisch op inzoomen.

- **Environmental detectors:** om de weerstoestand en/of de toestand van het wegdek te bepalen maakt men gebruik van pluviometers, windsnelheidsmeters en sensoren die de droogte of de natheid van het wegdek meten. Op basis van deze gegevens kan men dan al of niet beslissen een weg af te sluiten.
- **Luchttoezicht:** met videocamera's uitgeruste helikopters of kleine vliegtuigen zijn geschikt om incidenten, congestie en andere informatie i.v.m. de verkeerstoestand waar te nemen. Voordeel is dat er informatie wordt vergaard over een groot gebied: niet enkel de verkeerstoestand op de grote evacuatieroutes wordt duidelijk, maar ook deze op de kleinere wegen.
- **Probe surveillance:** dit is een alternatieve benadering voor het verzamelen van verkeersgegevens, waarbij de voertuigen zelf gaan dienst doen als *probes*. Men verkrijgt dan informatie over snelheden, reistijden en de herkomst en bestemming van de verplaatsingen, uiteraard enkel van die voertuigen die als probe werken. Technologieën die men in dit kader kan gebruiken zijn *automatic vehicle identification* en *automatic vehicle location identification*. Ook maakt men handig gebruik van de mogelijkheid om GSM-toestellen te lokaliseren.

Verspreiden van informatie

Ook voor het verspreiden van verkeersinformatie of raadgevingen naar de automobilisten toe bestaan er reeds een aantal systemen. Het is van belang dat er een minimale of bij voorkeur geen speciale uitrusting in de voertuigen is vereist voor het ontvangen van deze informatie. De twee meest gebruikte technologieën zijn:

- **Variable Message Signs (VMS):** dit zijn elektronische borden die boven de autosnelweg worden geplaatst en waarop tekst, verstuurd vanuit een controlecentrum, kan worden weergegeven. Er bestaan zowel vaste als verplaatsbare borden. De boodschappen moeten zo bondig mogelijk gehouden worden, aangezien de automobilisten de tijd moeten hebben de teksten te lezen en te begrijpen. VMS worden ook nog *Changeable of Dynamic Message Signs* genoemd. Een voorbeeld wordt getoond in figuur 3.4 (bron: US Department of Transportation (2003, p. 3)).
- **Highway Advisory Radio (HAR):** aangezien de meeste voertuigen over een autoradio beschikken, kan men heel wat automobilisten bereiken via de radio. De uitzendingen



Figuur 3.4: Variable Message Sign op 11 september 2001

van een HAR beperken zich tot een relatief klein gebied, zodat er enkel informatie specifiek voor dat gebied kan uitgezonden worden. De lengte van de boodschappen kan beduidend groter zijn dan bij VMS, maar is ook hier nog steeds beperkt. De actieradius van de meest gebruikte zendantennes is ongeveer 8 km. Rekening houdend met het feit dat een automobilist de boodschappen minstens twee maal moet kunnen horen, mag de duur van een boodschap maximaal 60 seconden bedragen.

Kenmerkend bij deze twee *Intelligent Transportation Systems* is dus de beperkte lengte van de boodschappen. Om dit op te vangen voorziet men in een aantal diensten die meer uitgebreide informatie verspreiden, zij het dat deze vooral toegankelijk zal zijn voor de mensen die nog niet vertrokken zijn. Via telefoon, internet, radio, televisie of in kiosken langs de autosnelwegen kan de bevolking al of niet interactief informatie verkrijgen i.v.m. de verkeers-toestand, de weersgesteldheid, raadgevingen over de routekeuze, locatie en beschikbaarheid van restaurants, hotels, pompstations, ziekenhuizen, . . .

Het feit dat sinds enkele jaren bijna iedereen over een GSM beschikt en dus naar nagenoeg de hele bevolking sms'jes kunnen gestuurd worden, biedt natuurlijk heel wat interessante mogelijkheden.

Freeway control

Om de capaciteit te verhogen, kan het nodig blijken één of meerdere rijstroken af te sluiten (om eventueel daarna van rijrichting te wisselen), of om op- of afritten volledig of gedeeltelijk af te sluiten. In het eerste geval spreken we over *Dynamic Mainline Control*, in het tweede

geval gaat het over *Ramp Control*.

Bij *Dynamic Mainline Control* maakt men gebruik van o.a. controlesignalen (in de vorm van een groene neerwaarts gerichte pijl of een oranje of rode X) boven elke rijstrook die de bruikbaarheid en toegankelijkheid van een rijstrook aangeven. Belangrijk bij zulke operaties is het houden van toezicht, waarvoor CCTV-cameras of sensoren die spookrijders kunnen detecteren gebruikt worden.

Ramp Control kan ingezet worden om vraag en capaciteit op mekaar af te stemmen en zo de verkeersafwikkeling op de evacuatie routes optimaal te laten verlopen. Men kan daartoe overgaan tot het volledig afsluiten van op- en/of afritten of tot toeritdosing, waarbij slechts een beperkt aantal voertuigen per minuut worden doorgelaten op de oprit. Dit laatste kan een belangrijke strategie zijn om de capaciteit van de grote evacuatie routes aanzienlijk beter te benutten, maar er dient wel geëvalueerd wat het effect ervan is op het lokale verkeer.

Verkeerslichtenregeling

Een mogelijkheid om de capaciteit van de wegen met verkeerslichtengeregelde kruispunten te verhogen, is het verlengen van de groentijd voor de hoofdwegen uit het te evacueren gebied. Er kan bijgevolg een aanzienlijk voordeel gehaald worden uit de implementatie van computergestuurde verkeerslichtenregeling, waarbij de signalisaties op verschillende kruispunten gecoördineerd kunnen worden. Tijdens evacuaties moeten de regelsystemen de snelle verandering in verkeersvraag vanuit de verschillende richtingen kunnen verwerken. Het is dan ook nodig om de verschillende verkeerslichtenregelingen op de grote evacuatie routes en deze op de wegen die leiden naar deze evacuatie routes als één geheel te benaderen (bv. invoeren van een groene golf), liefst dan nog rekening houdend met andere maatregelen zoals bv. het afsluiten van een weg.

Opmerkingen i.v.m. ITS

Volgend probleem dient echter gemeld. In stedelijke gebieden, waar alledaags verkeersmanagement bijna een must is, zijn er inderdaad reeds heel wat ITS operationeel. De evacuatie routes lopen echter grotendeels door landelijke gebieden, waar quasi geen ITS zijn voorzien. Bij evacuaties zal men dan bv. beroep moeten doen op verplaatsbare systemen.

Het is duidelijk dat deze technologieën potentieel de robuustheid van het verkeersnetwerk kunnen verhogen (zie het besluit in het volgende puntje). Maar deze systemen moeten zelf ook robuust zijn! Als er bv. bij een ramp het elektriciteitsnetwerk geraakt wordt en er is geen back-up voorzien voor de ITS, zal het nut ervan erg beperkt blijven. In augustus 2003 bestond de ramp er juist in dat de elektriciteitsvoorziening in de regio van de Grote Meren in het Noord-Oosten van de VS volledig uitviel, zodat tientallen miljoenen mensen zonder elektriciteit kwamen te zitten. In US Department of Transportation (2004), waar

het effect van deze panne op het transportsysteem wordt geanalyseerd, worden een aantal lessen getrokken, o.a. dat in de planningsfase die functionaliteiten van ITS dienen aangeduid die van nut kunnen zijn gedurende een noodsituatie en dat het een must is over voldoende betrouwbare back-up voor de stroomvoorziening voor deze functionaliteiten te beschikken.

Tenslotte merken we ook op dat deze technologieën niet enkel in de Verenigde Staten worden toegepast. Ook in Nederland en België maakt men er dankbaar gebruik van (zie bv. Vlaams Verkeerscentrum, p. 27).

Besluit

Al deze technologieën zorgen vooral voor een betere verzameling en verspreiding van informatie naar enerzijds de beleidsbepalers en anderzijds de bevolking. De toepassing van ITS bij evacuaties heeft dan ook volgende voordelen:

- **Reductie van de reistijden** t.g.v. de meer gebalanceerde benutting van de capaciteit van het ganse netwerk en de snellere respons op incidenten.
- **Verhoogde veiligheid** t.g.v. het verminderde risico dat een evacuatieroute volledig blokkeert. Er bevinden zich immers in dit laatste geval dan nog mensen in de wagen op de evacuatieroutes op het ogenblik dat de orkaan het land bereikt, hetgeen als een extreem gevaarlijke situatie bestempeld wordt. Ook het veiligheidsgevoel van de mensen verhoogt t.g.v. het feit dat ze voortdurend geïnformeerd worden.
- **Verbeterde voorbereiding bij volgende evacuaties** t.g.v. het nauwgezet verzamelen van de real-time gegevens over de verkeersafwikkeling en het gedrag van de bevolking. Op basis van die gegevens kan men dan de bestaande evacuatieplannen evalueren en indien nodig aanpassen.

3.3.3 Belemmering t.g.v. wegenwerken

Daar onderhouds- en constructiewerken aan de wegen ook tijdens het orkaanseizoen een noodzaak blijken, is het van belang te beseffen dat dit enorme gevolgen kan hebben op de verkeersafwikkeling tijdens een evacuatie. In heel wat staten probeert men conflicten te vermijden door extra clausules aan te brengen in de aannemingscontracten. In die clausules wordt de aannemer verplicht om bij een nakende evacuatie de weg volledig vrij en toegankelijk voor het verkeer te maken. Het is ook mogelijk de aannemer een bepaalde planning (zowel qua tijd als qua ruimte) op te leggen zodat het steeds mogelijk is om snel over de maximale capaciteit van de weg te kunnen beschikken. Het is echter duidelijk dat dit alles de prijs van de aannemingscontracten gevoelig kan verhogen.

3.3.4 Inzet van openbaar vervoer

In het voorgaande werd er stilzwijgend van uitgegaan dat iedereen het gebied verlaat per auto. Nochtans is er steeds een deel van de bevolking dat niet over een persoonlijk voertuig beschikt en dus aangewezen is op een of andere vorm van openbaar vervoer. Verder moet er ook rekening gehouden worden met de patiënten uit ziekenhuizen en rusthuizen, de gevangenen en een deel van de toeristen. De meest voor de hand liggende manier om deze zogenaamde *low mobility groups* te evacueren is het inleggen van bussen. In de praktijk hebben de meeste staten dan ook contracten afgesloten met openbaar vervoermaatschappijen, reisorganisatoren e.d. Vooraf dient evenwel een controleberekening te worden uitgevoerd of het aantal beschikbare bussen wel volstaat. Eventueel kunnen er voertuigen van het leger ingezet worden. Andere mogelijkheden zoals het evacueren per trein, helikopter of vliegtuig werden door een aantal staten als onpraktisch bestempeld.

3.3.5 Andere verkeersmanagementsmaatregelen

Openstellen van HOV Lanes

HOV Lanes (High Occupancy Vehicle Lanes), ook wel *carpool lanes* genoemd, zijn (rijstroken van) autosnelwegen waar enkel voertuigen worden toegelaten met een minimum aantal personen. Het openstellen van deze rijstroken voor alle verkeer, onafhankelijk van de bezettingsgraad van de voertuigen, kan ook een manier zijn om de capaciteit van het wegennetwerk verder te verhogen. Bij deze maatregel zijn echter wel een aantal opmerkingen te formuleren (Louis G. Neudorff *et al.*, 2003).

Ten eerste moet nagegaan worden of er geen *bottleneck* ontstaat op het einde van de *HOV Lane* en zo de capaciteit globaal gezien afneemt. In praktijk lopen de *HOV Lane* meestal parallel aan de autosnelweg, maar enkel op plaatsen waar dagelijks congestie heerst. Na een aantal kilometer, nl. daar waar de files meestal opgelost zijn, wordt het verkeer van op de *HOV Lanes* opnieuw op de autosnelweg geleid. Bij een evacuatie is het echter zo dat de files zich over een veel grotere lengte uitstrekken en er op die manier ter plaatse van de invoeging een *bottleneck* zal ontstaan.

Een tweede opmerking betreft het gedrag van mensen. Bij latere gelijkaardige situaties zal men immers verwachten dat de *HOV Lane* steeds zullen opengesteld worden, hetgeen misschien niet het geval is. Tenslotte zou het eigenlijk veel efficiënter zijn om de mensen juist aan te sporen om zoveel mogelijk te reizen in groep. Een hogere bezettingsgraad van de voertuigen betekent immers een kleinere totale verkeersvraag. Het openstellen van de *HOV Lanes* ondermijnt echter de maatregelen en oproepen naar de bevolking toe om de bezettingsgraad te verhogen.

Takeldiensten

Een ongeval of een panne op één van de evacuatieroutes kan nefaste gevolgen hebben. Het is dan ook van belang eventuele belemmeringen voor het verkeer zo snel mogelijk te verwijderen. Een uit het *Incident Management* overgewaaide maatregel om dit te bewerkstelligen, is het vooraf langs de evacuatieroutes stationeren van takelvoertuigen op een aantal goed gekozen plaatsen.

Bij uitbreiding kan men alle maatregelen en praktijken uit het *Incident Management* nuttig gebruiken bij een incident gedurende een evacuatie.

Minimalisatie van linksafslaande bewegingen

Bij de verkeersafwikkeling op kruispunten is de linksafslaande beweging de meest kritische (Vanderheyden, 2004). Hoe groter het aandeel linksafslaand verkeer, hoe beperkter de groentijd zal zijn voor het rechtdoorgaand verkeer. De capaciteit van de evacuatieroutes kan bijgevolg verhoogd worden door het minimaliseren van de linksafslaande bewegingen. Op de meest kritische kruispunten de linksafslaande beweging verbieden kan dus een effectieve verkeersmaatregel bij evacuaties zijn. Het minimaliseren van de linksafslaande bewegingen wordt in heel wat staten dan ook als één van de criteria beschouwd bij het vaststellen van de evacuatieroutes.

3.4 Opmerking

Het kan nooit kwaad je licht eens op te steken in andere landen en na te gaan hoe men daar tewerk gaat. We moeten echter wel beseffen dat de vergelijking tussen België en de Verenigde Staten op het gebied van het management van rampen en evacuaties enigszins oneerlijk is.

Zoals reeds gezegd is de kans op grootschalige evacuaties groter in de USA dan in België. Om dit te staven volstaat het te vermelden dat in de USA t.g.v. de orkanen een paar keer per decennium 3 miljoen mensen moeten geëvacueerd worden, hetgeen gelijk is aan de halve bevolking van heel Vlaanderen. In Vlaanderen daarentegen kan en durft men zich niet in te beelden dat half Vlaanderen moet geëvacueerd worden. De kans dat de helft van Vlaanderen moet geëvacueerd worden is inderdaad heel erg klein. We spreken in dit kader over *LPHC-events (Low Probability-High Consequence)*. Dit zijn gebeurtenissen waarvan de kans dat ze zich voordoen erg klein is, maar als ze zich dan toch voordoen een enorme schade tot gevolg hebben. Het risico, gelijk aan het product van kans en schade, is dan eigenlijk toch niet zomaar te verwaarlozen.

Daarenboven hechten de Amerikanen enorm veel belang aan hun *security & safety*, zeker sinds de terroristische aanslagen in New York en Washington. Na die aanslagen werd door president

Bush het Department of Homeland Security opgericht om de USA beter te beschermen en te beveiligen tegen alle mogelijke noodsituaties (aanslagen, orkanen, ...). Voor 2005 bedraagt het voorziene budget voor dit ministerie maar liefst 47 miljard US dollar (Office of Management and Budget, 2004, p. 26). Zowel qua financiële middelen als qua personeelsbestand is er dus eveneens een aanzienlijk verschil te noteren tussen België en de Verenigde Staten.

3.5 Besluit

In dit hoofdstuk werden de opgedane ervaring en de huidige praktijk bij grootschalige evacuaties in de Verenigde Staten besproken. Er blijkt dat men in de USA veel belang hecht aan het degelijk plannen van het verkeersluik van hun *hurricane evacuations*, mede als gevolg van enkele enorme congesties met bijhorende chaos bij evacuaties eind jaren '90.

Eerst werden in dit hoofdstuk kort een aantal zaken verteld die belangrijk zijn om het kader rond de evacuaties te schetsen. Vervolgens ging de aandacht uit naar specifieke verkeersgerelateerde zaken. Men gebruikt een hele set van plannen, maatregelen en hulpmiddelen om de verkeersafwikkeling zo vlot mogelijk te houden. De twee grote pijlers in die verkeersplannen zijn contraflow en ITS.

Vooraf het verhogen van de capaciteit voor het evacuerende verkeer, contraflow, wordt veel toegepast. Het principe, het omwisselen van de rijrichting van een aantal rijstroken, is eenvoudig, maar praktisch en organisatorisch komt er toch heel wat bij kijken. Bovendien zijn er verschillen qua ontwerp en uitvoering op te merken tussen de verschillende staten.

Ook van de hedendaagse technologie, de *Intelligent Transportation Systems*, maakt men gebruik. De uitgebreide verzameling tools die onder ITS vallen én die bruikbaar zijn bij evacuaties werden besproken. Het grote voordeel van de meeste van deze tools is dat ze ook ingezet kunnen worden voor het alledaagse verkeersmanagement.

Hoofdstuk 4

Verkeersmanagement bij rampen: Nederland

Uit de vorige twee hoofdstukken kan opgemaakt worden dat men in de Verenigde Staten toch aanzienlijk verder staat dan in België op het gebied van verkeersregeling bij evacuaties. Er werd echter aangegeven dat de vergelijking tussen ons land en de Verenigde Staten enigszins oneerlijk te noemen is. In dit hoofdstuk wordt de huidige praktijk in Nederland geschetst, waarbij kan aangenomen worden dat de vergelijking met ons land wel als eerlijk kan bestempeld worden, ook al is dit uiteraard een subjectieve beoordeling.

Ook hier is het de bedoeling om eerst op een bondige manier het algemene kader rond rampen en evacuaties aan te geven. Er wordt daartoe getracht een antwoord te geven op vragen als: Welke partijen spelen een rol? Welke zijn hun verantwoordelijkheden en hoe wordt dit allemaal georganiseerd? Tevens zal de vergelijking met België gemaakt worden.

In een volgende stap wordt dan gefocust op het verkeersluik. Er wordt aangegeven wie hiervoor verantwoordelijk is en er wordt getracht na te gaan of er bepaalde strategieën en/of specifieke verkeersregelplannen bestaan.

4.1 Rampenbeheersing

In het kader van deze thesis gaan we enkel de rampenplanning en -bestrijding bespreken binnen de rampenbeheersing, voornamelijk gebaseerd op een uitgave van het Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties Nederland (2003). Maar vooraleer die bespreking aan te vatten, schetsen we kort hoe Nederland, binnen het veiligheidsbeleid, bestuurlijk en operationeel georganiseerd is.

4.1.1 Deelnemende partijen en verantwoordelijkheden

Bestuurlijke organisatie

De diverse bestuursorganen hebben verschillende taken, bevoegdheden en verantwoordelijkheden, zowel bij de voorbereiding op als tijdens de bestrijding van rampen. Men onderscheidt vier verschillende bestuursniveaus: de gemeente, de regio, de provincie en het rijk. Om een idee te geven van de grootte van deze verschillende niveaus: er zijn in totaal 483 gemeenten, 25 regio's en 12 provincies (Ministerie van Buitenlandse Zaken Nederland, 2005). In deze paragraaf wordt een korte schets gegeven van deze verschillende niveaus. Welke plannen ze verplicht moeten opstellen wordt besproken in paragraaf 4.1.2.

De primaire verantwoordelijkheid voor de rampenbestrijding en rampenplanning ligt bij de **gemeenten**. Deze worden geacht het best in staat te zijn om een samenhangend veiligheidsbeleid vast te stellen, de aanwezige risico's te beoordelen en de gepaste maatregelen te treffen. Het *College van Burgemeester en Wethouders* is belast met de voorbereiding op de bestrijding van zware ongevallen en rampen. Bij een ramp treedt het gemeentelijk rampenplan in werking (zie verder) en heeft de burgemeester het opperbevel.

Veiligheidsproblemen overstijgen echter dikwijls de gemeentegrenzen, zodat het evenzeer noodzakelijk is de voorbereiding op de rampenbestrijding op een bovenlokaal niveau aan te pakken. Dat bovenlokaal niveau wordt bepaald door de **regio's**, die bestaan uit een aantal gemeenten. De verschillende gemeentebesturen van een regio dienen een gemeenschappelijke regeling te treffen voor een doelmatig georganiseerde brandweezorg en rampenbestrijding. In het kader van deze regelingen zijn de *regionale brandweren* ingesteld, dewelke een hoofdrol spelen bij de rampenbestrijding en de voorbereiding erop. Ook de andere hulpdiensten zijn opgesplitst in dezelfde regio's.

De **provincies** hebben vooral een toezichthoudende bevoegdheid t.a.v. de gemeenten en regio's. Het *College van Gedeputeerde Staten*, de Nederlandse tegenhanger van de Belgische Bestendige Deputatie, toetst de verschillende rampenplannen van de onderliggende niveaus. De *Commissaris van de Koningin*, de Nederlandse tegenhanger van de Belgische provinciegouverneur, heeft daarenboven een coördinerende taak bij de rampenbestrijding t.a.v. de gemeenten en regio's. Tenslotte vormt de provincie een belangrijke schakel tussen de gemeenten en de rijksoverheid.

Het **Rijk** is verantwoordelijk voor het hele systeem van de rampenbeheersing en schept de nodige randvoorwaarden aan de hand van wet- en regelgevingen. Het Rijk voorziet tevens in een deel van de financieringen en zorgt voor aanvullende voorzieningen voor een grootschalig optreden (materieel, landelijk sirenenet, ...).

Een vijfde bestuursorgaan, dat los staat van de vorige, zijn de **Waterschappen**. Waterschappen zijn decentrale overheden, die uitsluitend taken verrichten op het gebied van de waterstaatszorg. Momenteel zijn er in heel Nederland nog 27 Waterschappen (Unie van Wa-

terschappen, 2005). Hun belangrijkste taken zijn: zorg voor waterkering, waterkwaliteit en waterkwantiteit en het beheer van een aantal vaarwegen. Binnen het kader van de rampenbestrijding zijn deze waterschappen verplicht calamiteitenplannen op te stellen voor rampen met de zogenaamde waterstaatswerken (bv. rivieren, dijken, enz.).

Operationele organisatie

De uitvoering van de rampenbestrijding ligt in eerste instantie in handen van de diensten die de dagelijkse hulpverlening verzorgen: brandweer, politie en medische hulpverlening. Daarbovenop spelen ook de gemeentelijke diensten een rol.

De **brandweer**, ook wel de rode kolom binnen de rampenbestrijding genoemd, speelt een centrale rol bij de rampenbestrijding. Ook de **politie**, de blauwe kolom, is een belangrijke speler. De politie staat o.a. in voor het evacueren en ontruimen van bedreigde gebieden, de ordehandhaving en het treffen van verkeersmaatregelen. De taak van de **geneeskundige hulpverlening**, de witte kolom, spreekt voor zich. De **gemeentelijke diensten** tenslotte, de oranje of soms ook wel de groene kolom genoemd, zijn verplicht zich bezig te houden met zaken die vallen onder de noemer bevolkingszorg, zoals informatieverspreiding en opvang van geëvacueerden.

4.1.2 Rampenplanning

Ter voorbereiding op de bestrijding van rampen worden door gemeenten, regionale hulpverleningsdiensten, provincies en beheerders van waterstaatswerken plannen gemaakt, welke onder te verdelen zijn in twee grote groepen: bestrijdingsplannen en besturingsplannen. De bestrijdingsplannen zijn gericht op de daadwerkelijke bestrijding van de rampen. Besturingsplannen daarentegen zijn te beschouwen als beleids- en bedrijfsvoeringsplannen en omvatten de voorwaarden waarbinnen de rampenbestrijdingsorganisatie (brandweer, politie, geneeskundige hulpverlening) kan functioneren. We bespreken in deze paragraaf eerst de bestrijdingsplannen op het niveau van de gemeente, de waterschappen en de provincie. Daarna volgen de besturingsplannen, die enkel op het regionale niveau worden opgesteld.

Bestrijdingsplannen

Het eerste bestrijdingsplan is het **gemeentelijk rampenplan**. Hierin zijn de aanwezige risico's geïnventariseerd, wordt de organisatie van de rampenbestrijding (m.a.w. de taken, bevoegdheden en verantwoordelijkheden) uitgetekend en wordt het beleid t.a.v. de vast te stellen rampbestrijdingsplannen (zie verder) vastgelegd. Zulk gemeentelijk rampenplan is uitgewerkt in verschillende multidisciplinaire *deelplannen*, die meestal één rampbestrijdingsproces (bv. waarschuwen van de bevolking, regelen van het verkeer, ...) behandelen. Elk deelplan wordt dan op zijn beurt verder uitgewerkt in monodisciplinaire *draaiboeken* en *aanvalsplannen*.

Om de afstemming tussen de verschillende deelplannen en draaiboeken goed te laten verlopen, voorziet men binnen het gemeentelijk rampenplan een **operationeel basisplan (OBP)**. Dit OBP bevat gegevens die moeten toelaten om de juiste maatregelen sneller te kunnen nemen. Het gaat meer bepaald om contactgegevens van alle betrokkenen en gegevens over o.a. gebouwen, inwonersaantallen, aanwezige infrastructuur, enz.

Het gemeentelijk rampenplan geeft eveneens een overzicht van alle op het grondgebied van de gemeente aanwezige risicovolle situaties, waarvan de aard, plaats en de gevolgen voorzienbaar zijn. Voor elk specifiek risico-object, zoals bv. een Seveso-bedrijf, wordt dan een **rampbestrijdingsplan** opgesteld. Zulk rampbestrijdingsplan beschrijft voor desbetreffende locatie precies de risico's, de gevolgen, de inzet van de verschillende diensten, de manier van samenwerken en de bevoegdheidsverdeling.

Ook de beheerders van waterstaatswerken (de decentrale waterschappen en het centrale Rijkswaterstaat) zijn verplicht een eigen rampenplan op te stellen. Dit plan wordt een **calamiteitenplan** genoemd en bevat een overzicht van de organisatie, de waarschuwingsprocedures en de afspraken voor het optreden bij waterstaatkundige calamiteiten. Het is bij wet verplicht deze calamiteitenplannen af te stemmen op de rampen- en rampbestrijdingsplannen van het gebied waar het waterstaatwerk zich bevindt.

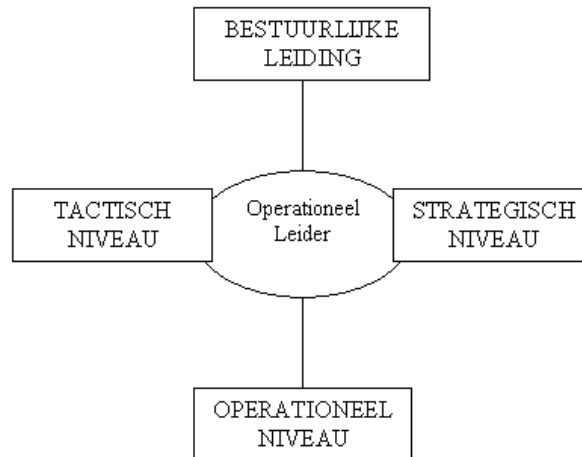
Tenslotte hebben de provincies ook een eigen rampenplan, het **provinciaal coördinatieplan**. Zoals de naam reeds aangeeft heeft dit plan vooral een coördinerend doel bij rampen op provinciaal niveau. Zo worden er in dat plan zaken bepaald zoals de leiding over en de inzet van diensten bij zulke grootschalige rampen.

Besturingsplannen

Nu gaan we over tot de bespreking van de besturingsplannen, dewelke worden opgesteld op het niveau van de regio.

Onder leiding van de regionale brandweer, maar samen met de andere regionale hulpdiensten (politie en geneeskundige hulpverlening) van diezelfde regio, wordt een **regionaal beheersplan** opgemaakt. Doel van dit plan is de organisatie van de rampenbestrijding in de verschillende hulpdiensten op elkaar af te stemmen. Ook wordt het beleid t.a.v. de multidisciplinaire voorbereiding vastgelegd. Tenslotte zijn de opleidings- en inoefenplannen onderdeel van dit regionaal beheersplan.

Op basis van dat multidisciplinaire beheersplan moet iedere regionale hulpverleningsdienst op zich een **organisatieplan** opstellen. Hierin worden de gemaakte afspraken dan vertaald naar interne organisatie, personeel en materieel toe.



Figuur 4.1: Hiërarchie binnen de rampbestrijding

4.1.3 Rampenbestrijding

Wat betreft de rampenbestrijding zelf gaan we kort in op de twee voornaamste zaken: de organisatie op het rampterrein zelf en het principe van opschaling. We beperken deze bespreking tot de essentie, aangezien het in het kader van deze thesis niet de bedoeling is de rampenbestrijding gedetailleerd uit de doeken te doen.

Organisatiestructuur

Met de bestrijding van rampen zijn heel wat diensten en functionarissen gemoeid. Zolang er zich geen crisissituatie voordoet, is de rampenbestrijdingsorganisatie per definitie onbestaande. Zodra een ramp zich voordoet, gaan alle betrokken functionarissen en diensten volgens het principe van opschaling (zie volgend puntje) werken binnen een vooraf vastgelegde organisatiestructuur.

Men onderscheidt bij de organisatie van de rampenbestrijding drie niveaus: het tactische, het strategische en het operationele. Het geheel wordt gecoördineerd en bestuurd door de bestuurlijke leiding, die in handen ligt van één burgemeester, verschillende burgemeesters in overleg, de Commissaris van de Koningin of de Minister van Binnenlandse Zaken, afhankelijk van het geactiveerde schaalniveau. Op het schema van figuur 4.1 wordt de hiërarchie vereenvoudigd weergegeven.

Het **tactisch** niveau is verantwoordelijk voor een gecoördineerde uitvoering van de rampenbestrijding en moet ervoor zorgen dat iedereen zijn taken op het terrein daadwerkelijk kan uitvoeren, door bv. een degelijke verdeling van middelen en eenheden. De tactische staf is samengesteld uit vertegenwoordigers van de verschillende disciplines.

Het **strategisch** niveau, eveneens multidisciplinair samengesteld, ondersteunt de bestuurlijke leiding door het uitbrengen van adviezen bij het nemen van beleidsbeslissingen.

Het **operationele** niveau tenslotte zorgt voor de daadwerkelijke acties op het terrein. Het zijn de verschillende disciplines die uitvoeren wat hen opgedragen wordt. Dit niveau wordt op zich nog verder hiërarchisch gestructureerd.

Een belangrijke figuur is de Operationeel Leider (OL). Deze adviseert en informeert de burgemeester (de bestuurlijke leiding) en vertaalt door het beleid genomen beslissingen in uitvoeren opdrachten. De OL staat dus onder bevel van de burgemeester en heeft zelf de leiding over het operationele niveau. Daarenboven zetelt hij in de staf én van het tactisch én het strategisch niveau.

Opschaling

De verschillende hulpdiensten werken in normale omstandigheden onafhankelijk van mekaar. Van zodra er zich een ramp heeft voorgedaan, moeten de verschillende diensten echter samenwerken binnen de afgesproken organisatiestructuren. De overgang van het dagelijkse monodisciplinaire functioneren tot één multidisciplinaire rampenbestrijdingsorganisatie, wordt het proces van opschaling genoemd. Om die opschaling en de multidisciplinaire coördinatie vlot te laten verlopen, wordt de procedure van het opschalingsproces per regio vastgelegd in *Gecoördineerde Regionale IncidentenbestrijdingsProcedures (GRIP)*.

We overlopen hier de verschillende schaalniveaus. Met elk schaalniveau stemt een bepaalde invulling van de hierboven geschetste organisatiestructuur overeen. Net zoals in België beslist de persoon die het commando voert op een bepaald schaalniveau of er al dan niet naar een hoger niveau zal moeten overgegaan worden.

Een “gewoon incident” wordt afgehandeld op basis van de dagelijkse routine. Wanneer de complexiteit van het incident echter zodanig is dat er behoefte is aan een gestructureerde coördinatie of aan extra materieel, vindt er opschaling plaats naar schaalniveau GRIP-1. Dit houdt een routinematige coördinatie ter plaatse in. Er wordt enkel een operationele staf ingericht, geen strategische of tactische.

Indien er behoefte is aan een éénhoofdige leiding of indien het effectgebied groter is dan het rampterrein zelf, wordt er opgeschaald naar GRIP-2. Dit schaalniveau komt overeen met een bestuurlijke coördinatie op gemeentelijk niveau en een operationele leiding op het regionaal niveau. Vanaf dit niveau wordt zowel op het operationele, strategische als tactische niveau een staf opgericht. Het is wel zo dat de benaming en de invulling van deze staven wijzigt met stijgend schaalniveau.

Naar GRIP-3 wordt overgestapt o.a. indien de openbare orde ernstig verstoord is, er een ernstige bedreiging is voor vele personen, milieu en materiële belangen of indien meerdere gemeenten getroffen zijn. Hier vindt de bestuurlijke coördinatie plaats op het regionale niveau. Eenmaal de ramp de grenzen van een regio of provincie overschrijdt, wordt er opgeschaald tot GRIP-4, met bestuurlijke coördinatie op provinciaal (Commissaris van de Koningin) of zelfs

landelijk niveau (Minister van Binnenlandse Zaken).

4.1.4 Vergelijking met België

In beide landen is het uitgangspunt bij de rampenplanning en -bestrijding dat de hulp bij rampen wordt geboden door de hulpverleningsdiensten van alledag, zodat men kan terugvallen op routine (Hertoghs & Rambach, 1997). In Nederland wordt de rampenbestrijding inderdaad volledig uitgevoerd door de reguliere diensten, terwijl in België naast alle reguliere diensten toch nog één specifieke organisatie optreedt, nl. de Civiele Bescherming.

In beide landen hanteert men eveneens het proces van opschaling: de Belgische schaalniveaus *fase I* t.e.m. *fase IV* vertonen sterke gelijkenis met de Nederlandse *GRIP-1* t.e.m. *GRIP-4*. Ook de verdeling in respectievelijk de vijf disciplines in de rampenbestrijding en de vier kolommen van de rampenbestrijding is quasi identiek. De vijfde discipline in België, de informatie aan de bevolking, is in Nederland gevat in de oranje kolom, de gemeentediensten. Qua organisatiestructuur bij de rampenbestrijding zijn er gelijkaardige basisprincipes vast te stellen. Daar waar in België de opsplitsing wordt gemaakt in het beleidsniveau en het niveau van de operaties zelf, splitst men in Nederland het beleidsniveau op in een strategisch en tactisch niveau. In beide landen is de bestuurlijke leiding in handen van de burgemeester, of desgevallend van de provinciegouverneur (Commissaris van de Koningin) of van de Minister van Binnenlandse Zaken.

Wat betreft de rampenplanning kunnen we nog een laatste overeenkomst aangeven: in België onderscheidt men algemene en specifieke rampenplannen (voor specifieke, gekende risico's), in Nederland de rampenplannen en de rampbestrijdingsplannen.

Er zijn natuurlijk ook een aantal opmerkelijke verschillen te noteren. In België is het provinciaal rampenplan de basis in de rampenplanning en moeten de gemeentelijke rampenplannen hiermee conform zijn. In Nederland spelen de gemeenten een veel crucialere rol en hebben de provinciale rampenplannen een coördinerende functie. Op het bestuurlijke niveau heeft de provinciegouverneur, binnen het kader van de rampenbeheersing weliswaar, meer te zeggen dan zijn Nederlandse collega de Commissaris van de Koningin. Het omgekeerde geldt dan voor de burgemeesters.

In België zijn er, in tegenstelling tot in Nederland, geen regionale hulpverleningsdiensten met een eigen bestuursbevoegdheid. Evenmin is er in België een overeenstemmende indeling in zones tussen de verschillende hulpdiensten, terwijl dit in Nederland wel het geval is.¹

¹Sinds de Belgische wet van 28 februari 1999 tot wijziging van de wet (van 31 december 1963) betreffende de civiele bescherming, is de brandweer ingedeeld in hulpverleningszones ter grootte van een tiental gemeenten (zie <http://www.vlaamsbrabant.be/levenenwonen/veiligheid/veiligheidContent.jsp?page=4164>). Sinds de politiehervorming van enkele jaren geleden is de lokale politie ingedeeld in politiezones ter grootte van drie à vier gemeenten (<http://www.info-zone.be/home.htm>).

4.2 Verkeer en rampen

4.2.1 Werkwijze

De zoektocht naar specifieke verkeersplannen bij rampen en evacuaties in Nederland verliep analoog aan deze in België, zij het minder uitgebreid. Er werd contact genomen met de (diensten van de) Commissaris van de Koningin van elke provincie, omdat er kan van uitgegaan worden dat deze een beeld hebben van wat er zoal aan dergelijke plannen bestaat in de desbetreffende provincie. Verder werd bij wijze van steekproef dezelfde vraag gesteld aan de politiediensten van enkele grote steden en enkele gemeenten.

4.2.2 Bestaande plannen

In deze paragraaf bespreken we een aantal bestaande verkeersregelplannen die door diverse contactpersonen werden opgestuurd. Het is duidelijk dat onderstaande opsomming niet-limitatief is. We sluiten deze paragraaf af met het formuleren van enkele besluiten.

Overstroming en dijkdoorbraak Ooijpolder

Een eerste plan dat besproken wordt is het *intergemeentelijk rampbestrijdingsplan overstroming en dijkdoorbraak dijkring Ooijpolder* (Veldhoen, 2004). Het werkingsgebied van dit plan omvat de gemeenten Millingen a.d. Rijn, Ubbergen, Groesbeek en Nijmegen in de provincie Gelderland. Deze gemeenten lopen mogelijk onder water bij een dijkdoorbraak van de rivier de Waal of, iets verder stroomopwaarts, de Rijn. In dat rampbestrijdingsplan wordt veel aandacht geschonken aan de evacuatie, zowel van personen als van vee.

Een deel van het rampbestrijdingsplan is het evacuatie- en terugkeerplan. Hierin wordt voor eerst een overzicht gegeven van alle betrokken gemeenten en deelgemeenten met telkens het aantal inwoners en het aantal woningen. Het gaat hier in totaal om ongeveer 15 000 inwoners en 6 200 woningen. Verder worden de overstromingsrisico's nauwkeurig beschreven en wordt o.a. aangegeven welke diensten welke verantwoordelijkheden hebben.

De verkeersregeling bij een evacuatie wordt volledig uitgewerkt in het *draaiboek politie: evacuatie*. Hierin wordt in chronologische volgorde vermeld welke stappen ondernomen dienen te worden om een geplande evacuatie goed te laten verlopen. Afhankelijk van de plaats van de (nakende) dijkdoorbraak of overstroming zal met evacuatie begonnen worden in de zones die het eerst bedreigd worden. Het draaiboek bevat informatie over o.a.:

- **evacuateroutes** voor de verschillende scenario's, rekening houdend met het feit dat de dijken zelf in een vroeg stadium worden afgesloten aangezien deze niet extra mogen worden belast bij hoogwater. Deze routes werden bepaald met het oog op minimale verkeersstremmingen;

- **door de overheid te evacueren inwoners**, met opsomming van de plaatsen waar deze evacués zich moeten verzamelen en welke trajecten de verschillende bussen moeten volgen. Men gaat ervan uit dat 90 % van de bevolking zelfstandig kan evacueren en dat er voor de resterende personen zowat 40 bussen nodig zijn. Men schat dat de evacuatie van deze groep mensen 4 uur in beslag neemt, op voorwaarde dat de bussen beschikbaar zijn;
- **te treffen verkeersmaatregelen**, voornamelijk dan welke wegen moeten worden afgesloten en welk personeel en materieel hiervoor nodig is;
- **benodigd personeel en materieel**.

Wat betreft de evacuatie van het vee worden gelijkaardige zaken vastgesteld. Er wordt wel aangegeven dat eenmaal het besluit tot evacuatie van de bevolking wordt genomen, deze de absolute prioriteit krijgt en de evacuatie van het vee indien nodig dient stilgelegd te worden.

Havengebied Rotterdam

Voor ca. 65 risicovolle bedrijven in het Rotterdamse havengebied werd een rampbestrijdingsplan opgesteld (van Eijk, 2004). Wat betreft de verkeersregeling staat in elk van die plannen uitgewerkt welke wegen moeten worden afgesloten, op welke locaties verkeerscirculatieposten moeten worden geplaatst en welke de aan- en afvoerroutes zijn voor de hulpdiensten. Deze plannen zijn dus erg gelijkaardig aan de verkeersplannen in de haven van Antwerpen (zie paragraaf 2.2.4).

Schiphol

Ook het rampbestrijdingsplan van de Nederlandse nationale luchthaven Schiphol bevat specifieke en uitgewerkte verkeersplannen. Dhr. Arthur Rietkerk, verkeerscoördinator bij de provincie Noord-Holland, stelde het deelprocesplan “verkeersmaatregelen” ter uitvoering van het rampbestrijdingsplan Schiphol ter beschikking (Rietkerk, 2004).

Dat plan beschrijft de te treffen verkeersmaatregelen in het gebied buiten het luchthaventerrein bij een ramp op de luchthaven Schiphol of in de directe omgeving ervan. Het doel van deze verkeersmaatregelen is het voorkomen van stagnatie (op verkeerstechnisch gebied) van de hulpverlening en van verkeersonveilige situaties door:

- het op een zodanige manier regelen van het verkeer ten tijde van een ramp (of dreiging daarvan) dat de bij de hulpverlening betrokken hulpverleners zo min mogelijk hinder ondervinden van en naar de luchthaven;
- de begeleiding van het verkeer naar de luchthaven van de bij de hulpverlening betrokken organisaties en personen.

In het plan wordt tevens zeer duidelijk afgelijnd wanneer het in werking treedt, wie welke verantwoordelijkheden draagt, wie de leiding en de coördinatie in handen heeft en welke de algemene strategie achter het plan is.

Het verkeersplan zelf bestaat o.a. uit volgende onderdelen:

- beschrijving van de aanwezige infrastructuur: belangrijkste verkeersaders, tunnels, bruggen, spoorwegen, enz.;
- beschrijving van de aan- en afvoerroutes van de hulpdiensten, met aanduiding van de te treffen maatregelen om deze routes zoveel mogelijk vrij te houden;
- aanduiding van welke wegen kunnen afgesloten worden indien nodig;
- uitgangspunten van het verkeerscirculatieplan met de omleidingroutes;
- opsomming van het in te zetten personeel en materieel.

Calamiteitenroutes

Net zoals in België (zie paragraaf 2.2.4) werden in Nederland voor elk wegvak van het autosnelwegennet omleidingsplannen uitgewerkt. Men spreekt over calamiteitenroutes (CAR). Deze werden uitgewerkt door Rijkswaterstaat, de wegbeheerder op het niveau van de autosnelwegen (Aarts, 2004).

4.2.3 Gehechte belang aan ontwikkelen evacuatieplannen

Recent is men in Nederland, vooral t.g.v. de overstromingen in 1995 en de zware overstromingen van 1953 indachtig, meer en meer belang gaan hechten aan het opstellen van evacuatieplannen. Dit houdt echter (nog) niet in dat overal gedetailleerde evacuatieplannen klaarliggen, wel wordt er in toenemende mate aandacht geschonken aan het ontwikkelen ervan (Klunder, 2005). Dit wordt hier geïllustreerd aan de hand van een tweetal voorbeelden.

DSS Emergency Planning

Het Decision Support System (DSS) Emergency Planning is een beslissingsondersteunend systeem bij (nakende) overstromingen, maar kan ook toegepast worden voor andere types rampen waar evacuaties mee gepaard gaan. Het werd in Nederland ontwikkeld in het kader van het Europees project ESCAPE, dat zich richt op de te ondernemen acties wanneer een dijk dreigt door te breken of overstroomd te worden. Daarbij betreft het project mogelijke bijdragen vanuit ruimtelijke planning, risicomanagementstrategieën, rampenplannen en wil het de publieke bewustwording van potentiële gevaren vergroten. Meer info over het ESCAPE-project is te vinden op <http://www.delta2003.nl>. Hier gaan we achtereenvolgens verder in

op de doelstellingen, de algemene architectuur en de voordelen van het systeem (Windhouwer *et al.*, 2004).

Het DSS Emergency Planning geeft een antwoord op de vraag of er nog geëvacueerd kan worden. Doorslaggevend voor dit advies is de controle of er voldoende tijd beschikbaar is om alle inwoners uit het bedreigde gebied in veiligheid te brengen. Hiervoor werd een evacuatiemodel ontwikkeld door TNO Inro. Dit evacuatiemodel wordt besproken in hoofdstuk 5. Het bepaalt een evacuatiestrategie zodanig dat er geen congestie op de evacuatieroutes zal ontstaan. Essentieel is dus dat het over een georganiseerde evacuatie gaat.

Wanneer bepaalde geplande evacuatieroutes tijdens de evacuatie niet beschikbaar blijken, bv. door wegenwerken, geeft het DSS suggesties voor alternatieve routes met daarbij het ermee gepaard gaande effect op de tijdsduur van de evacuatie. Tenslotte wordt ook advies gegeven indien de beschikbare tijd voor evacuatie onvoldoende blijkt voor de evacuatie van het hele gebied. Het DSS geeft dan aan welke inwoners in het gebied zullen moeten worden opgevangen en welke toch nog kunnen geëvacueerd worden. Eén van de belangrijke veronderstellingen is nl. dat de evacuatie moet voltooid zijn op het ogenblik van overstroming. Er moet immers ten allen tijde voorkomen worden dat mensen tijdens de evacuatie overvallen worden door het hoge water.

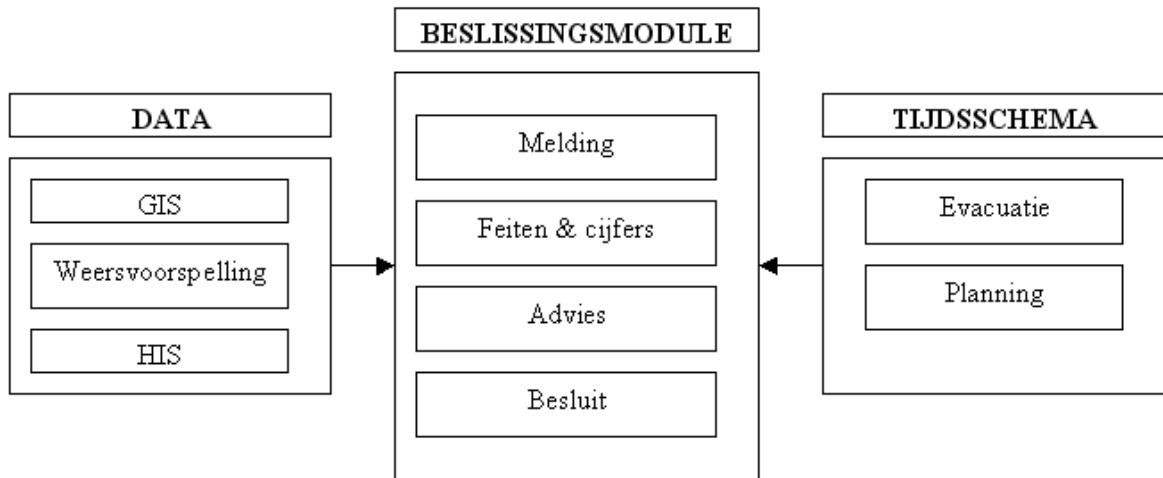
In figuur 4.2 wordt de architectuur van het DSS geschetst. Het systeem is opgebouwd uit verschillende modules.

Vooraleer advies gegeven kan worden, moeten uiteraard data ingevoerd worden zoals bevolkingsaantallen en kenmerken van het wegennet. Deze worden geleverd door de GIS-module. Daarnaast is ook nood aan meer dynamische informatie zoals weersvoorspellingen. De HIS-module (Hoogwater Informatie Systeem) levert aan het DSS een voorspelling van het tijdstip waarop de kritische waterstand wordt overschreden en geeft tegelijkertijd aan welk gebied onder water zal lopen.

Al deze data worden gebruikt door de evacuatiemodule voor de schatting van de evacuatieuur (zie paragraaf B.7) en door de planningsmodule voor het opstellen van een uitvoeringsplanning.

De kern van het systeem is de beslissingsmodule. Op basis van enerzijds de van de hiervoor vermelde modules afkomstige informatie en anderzijds vooraf bepaalde beslissingsregels wordt hier het advies bepaald.

De kracht van het DSS ligt vooral in de ondersteuning bij het opstellen van de rampen- en evacuatieplannen. Voor elk gebied wordt nl. een scenario voorbereid om in geval van een overstroming iedereen in veiligheid te brengen. Het geeft inzicht in de te gebruiken evacuatieroutes, opvangcentra en in de activiteiten met hun tijdsduur in de verschillende fases van de evacuatie.



Figuur 4.2: Architectuur DSS Emergency Planning

Het DSS laat echter ook toe adequaat te reageren op het moment van de dreiging zelf, bv. door rekening te houden met de actuele situatie van het wegennet.

Een laatste troef is het feit dat het systeem kan gebruikt worden bij de voorlichting van de bevolking. Er kan nl. visueel worden verduidelijkt waarom een georganiseerde evacuatie essentieel is, zodat de inwoners meer geneigd zullen zijn de oproepen en raadgevingen van de overheid daadwerkelijk op te volgen.

Hoogwater Informatie Systeem

Het Hoogwater Informatie Systeem (HIS) kwam reeds ter sprake in de vorige paragraaf als leverancier van informatie en voorspellingen i.v.m. waterstanden en dijkdoorbraken. Het systeem blijkt echter veel uitgebreider te zijn. Het HIS is een samenhangend systeem dat:

- in de voorbereiding op hoogwater inzicht geeft in de gevolgen van een mogelijk falen van het systeem van waterkeringen;
- communicatie tijdens hoogwater bevordert (zowel tussen mensen als tussen systemen);
- tijdens hoogwater informatie verstrekt over de toestand van de waterkeringen en over de gevolgen van een eventueel falen van een waterkering.

Na de overstromingen van december 1993 en januari 1995 hebben diverse organisaties (o.a. provincies Oost-Nederland, Overijssel, Gelderland) het initiatief genomen om een Hoogwater Informatie Systeem (HIS) te ontwikkelen. In 1998 is door Rijk en Provincies besloten om dit gezamenlijk aan te pakken. Eind 2001 werd een eerste versie van het HIS opgeleverd.

Het HIS bestaat uit een beleidsondersteunend en een operationeel deel, waarbij elk deel modulair is opgebouwd. Het operationele deel van het HIS bestaat uit de Monitoring- en Logboekmodule, het beleidsmatige deel uit de Overstromingsmodule, de Schade- en Slachtoffermodule en de Evacuatiemodule.

De *Monitoring- en Logboekmodule* geven een gedetailleerd inzicht in het verloop van de waterstanden en gegevens over de waterkering, zodat een beeld gegeven wordt in hoeverre het hoogwater gevaar oplevert. De *Overstromingsmodule* bestaat uit een overstromingsmodel dat voorspelt welke gebieden in welke mate i.f.v. de tijd zullen overstromen. De *Schade- en Slachtoffermodule* geeft inzicht in het aantal slachtoffers en de omvang van de schade waarmee rekening moet gehouden worden bij een eventuele overstroming. De *Evacuatiemodule* bepaalt het percentage van de bevolking dat kan geëvacueerd worden i.f.v. de tijd (van Noortwijk & van Maarseveen, 2002). Deze module werd echter nog niet volledig uitgewerkt. Wel werd reeds een *evacuatiecalculator* ontwikkeld, waarmee het mogelijk is een inschatting te doen van de benodigde tijd om een gebied te evacueren. Deze evacuatiecalculator maakt gebruik van verkeersmodellen en wordt daarom besproken in bijlage B.8.

Meer info over het HIS is te vinden op <http://www.hisinfo.nl/index2.htm>.

4.2.4 Vergelijking met België

Wanneer we de bestaande plannen en praktijk vergelijken met de Belgische, kunnen we toch een aantal zaken concluderen.

Een eerste besluit is dat er daadwerkelijk specifieke en volledig uitgewerkte evacuatieplannen bestaan, zoals in het geval van een overstroming in Ooijpolder. Iets gelijkaardigs bestaat niet in België.

Een tweede verschil is de aanwezigheid van concrete verkeersregelplannen in de specifieke rampenplannen of rampbestrijdingsplannen. In de Nederlandse rampbestrijdingsplannen, zoals bv. dat van Schiphol, worden de te treffen verkeersmaatregelen bij een ramp gedetailleerd uitgewerkt. Dit wordt bevestigd door de praktijk in de provincie Limburg, waar in de bestaande rampbestrijdingsplannen de nodige verkeerscirculatieplannen en calamiteitenroutes zijn opgenomen (Janssen, 2004). De Belgische specifieke rampenplannen gaan niet zo ver in het vooraf opstellen van verkeersplannen. Een persoonlijke indruk is dat men zich, aanzienlijk meer dan in Nederland, verschuift achter het onvoorspelbare karakter van rampen en dus sterk rekent op de terreinkennis van het aanwezige personeel. In vergelijking met Nederland bevinden er zich in de Belgische planvorming dus toch een aantal gaten.

Tenslotte zijn er ook een aantal gelijkenissen met België op te merken. Het rampbestrijdingsplan met bijhorende verkeersregelplannen voor de haven van Rotterdam lijkt, op het eerste zicht althans, analoog aan dat voor de Antwerpse haven. Ook het vooraf plannen van omleidingswegen of calamiteitenroutes voor het eventueel afsluiten (t.g.v. een zwaar ongeval of een ramp in de nabijheid) van een segment van een autosnelweg is een welbekende praktijk

in beide landen.

In vergelijking met België staat Nederland dus toch verder op het gebied van de planvorming. Het is echter niet zo dat overal kant-en-klare evacuatieplannen ontwikkeld zijn, maar sinds een tiental jaren is men meer en meer het belang ervan gaan inzien en werden projecten gestart om evacuatieplannen op een stevig onderbouwde manier te gaan ontwikkelen. Gelijkaardige projecten en modellen als DSS Emergency Planning en HIS bestaan niet in België.

4.3 Besluit

In dit hoofdstuk werd de huidige Nederlandse praktijk op het gebied van de verkeersregeling bij rampen geschetst. Net zoals in de vorige hoofdstukken werd daarom eerst het kader daarrond, nl. hoe de rampenbeheersing is georganiseerd, besproken. Ter synthese werd telkens de vergelijking gemaakt met de Belgische situatie.

Wat betreft de rampenbeheersing zijn er heel wat gelijkenissen te noteren tussen Nederland en België, zoals o.a. de organisatiestructuur bij de rampenbestrijding, het principe van opschaling en het onderscheid tussen algemene en specifieke rampenplannen. Verschillend is echter het relatief gewicht dat aan de gemeenten en de provincies wordt toegekend, zowel bij de planning als bij de daadwerkelijke bestrijding. Belangrijkste verschil is het ontbreken van regionale hulpverleningsdiensten in België. Daarenboven is er geen overeenstemming tussen de verschillende hulpdiensten wat betreft de functionele indeling van het grondgebied in zones, dit ondanks de recente politiehervorming waarbij de indeling in politiezones werd vastgelegd.

In het tweede deel van dit hoofdstuk werden vooreerst een aantal bestaande concrete plannen besproken die specifiek handelen over het regelen van het verkeer bij rampen en evacuaties. Op basis daarvan kon reeds besloten worden dat men, in tegenstelling tot België, beschikt over gedetailleerd uitgewerkte evacuatieplannen, zoals bv. voor een dreigende overstroming in Ooijpolder. Daarenboven gaat men in Nederland veel verder in het uitwerken van verkeersregelplannen binnen de rampbestrijdingsplannen. Daar waar in België in de rampenplannen enkel wordt aangegeven wie verantwoordelijk is voor de verkeersregeling, worden in Nederland de te treffen verkeersmaatregelen gedetailleerd opgesomd. Het is echter niet zo dat in Nederland overal kant-en-klare evacuatieplannen klaarliggen. Sinds de overstromingen van 1995 is men echter meer en meer belang gaan hechten aan het ontwikkelen van dergelijke evacuatieplannen.

Dit alles maakt dat toch geconcludeerd mag worden dat men in België nog niet doordrongen is van het belang van evacuatieplannen. Een verzachtende omstandigheid is het feit dat de in Nederland ontwikkelde modellen voornamelijk gericht zijn op overstromingen en dat de kans op grootschalige overstromingen er aanzienlijk groter is dan in België. Hoe dan ook, de in

Nederland gedane inspanningen zullen sowieso hun vruchten afwerpen bij een evacuatie t.g.v. eender welke soort ramp.

Hoofdstuk 5

Modelleren van evacuaties

In het eerste deel van deze thesis (hoofdstukken 2 t.e.m. 4), werd de huidige praktijk in België, de Verenigde Staten en Nederland op het gebied van verkeersregeling bij rampen en evacuaties besproken.

Het tweede gedeelte spitst zich specifiek toe op het modelleren van het verkeer bij evacuaties, een taak die typisch is weggelegd voor verkeerskundigen. Dit hoofdstuk geeft aan wat hierbij allemaal komt kijken, in het volgende hoofdstuk wordt dan aan de hand van een case study aan dit alles een eigen concrete uitwerking gegeven.

Dit hoofdstuk behandelt dus het modelleren van het verkeer bij evacuaties. Vooreerst wordt aangetoond wat daar nu juist het belang en het nut van is. Vervolgens, na het schetsen van het algemeen kader van het modelleren van evacuaties, wordt aangegeven welke de gelijknissen en verschillen zijn tussen het modelleren van het verkeer in ‘normale’ situaties en het verkeer tijdens evacuaties. Uit het geschetste algemene kader zal blijken dat een evacuatiemodel opgebouwd is uit een aantal submodellen. In een volgende paragraaf zal een overzicht gegeven worden met de verschillende mogelijke uitwerkingen die aan die submodellen kunnen gegeven worden. Tot slot worden een aantal bestaande evacuatiemodellen en -pakketten op een rijtje gezet en besproken.

5.1 Belang en nut van modelleren

Uit de vorige hoofdstukken, vooral dan hoofdstuk 3, blijkt het belang van het op voorhand opstellen van evacuatieplannen, denken we maar aan de enorme verkeerschaos bij de orkanen Georges en Floyd. De meest aangewezen methode om de evacuateroutes en evacuatieplannen op voorhand uit te tekenen, is het modelleren van het verkeer bij grootschalige evacuaties. Uiteraard zal de terreinkennis van het personeel een belangrijke rol blijven spelen. Modelleren kan als analyse- en planningstool gebruikt worden, meer bepaald voor het:

- identificeren van probleempunten en bottlenecks;

- testen van alternatieve evacuatieplannen;
- kwantificeren van het nut van verkeersmanagement (bv. contraflow);
- schatten van de evacuatietijd en van het aantal mensen dat in veiligheid kan gebracht worden.

Meer en meer kunnen deze modellen niet alleen gebruikt worden om op voorhand evacuatieplannen uit te tekenen, maar ook om strategieën op korte termijn te ontwikkelen, bv. bij het naderen van een orkaan. Potentieel kunnen modellen zelfs real-time ingezet worden (Barrett *et al.*, 2000, p. 2).

Tenslotte worden evacuatiemodellen ingeschakeld in beslissingsondersteunende systemen, de zogenaamde Decision Support Systems (zie paragraaf B.10.1).

5.2 Kader

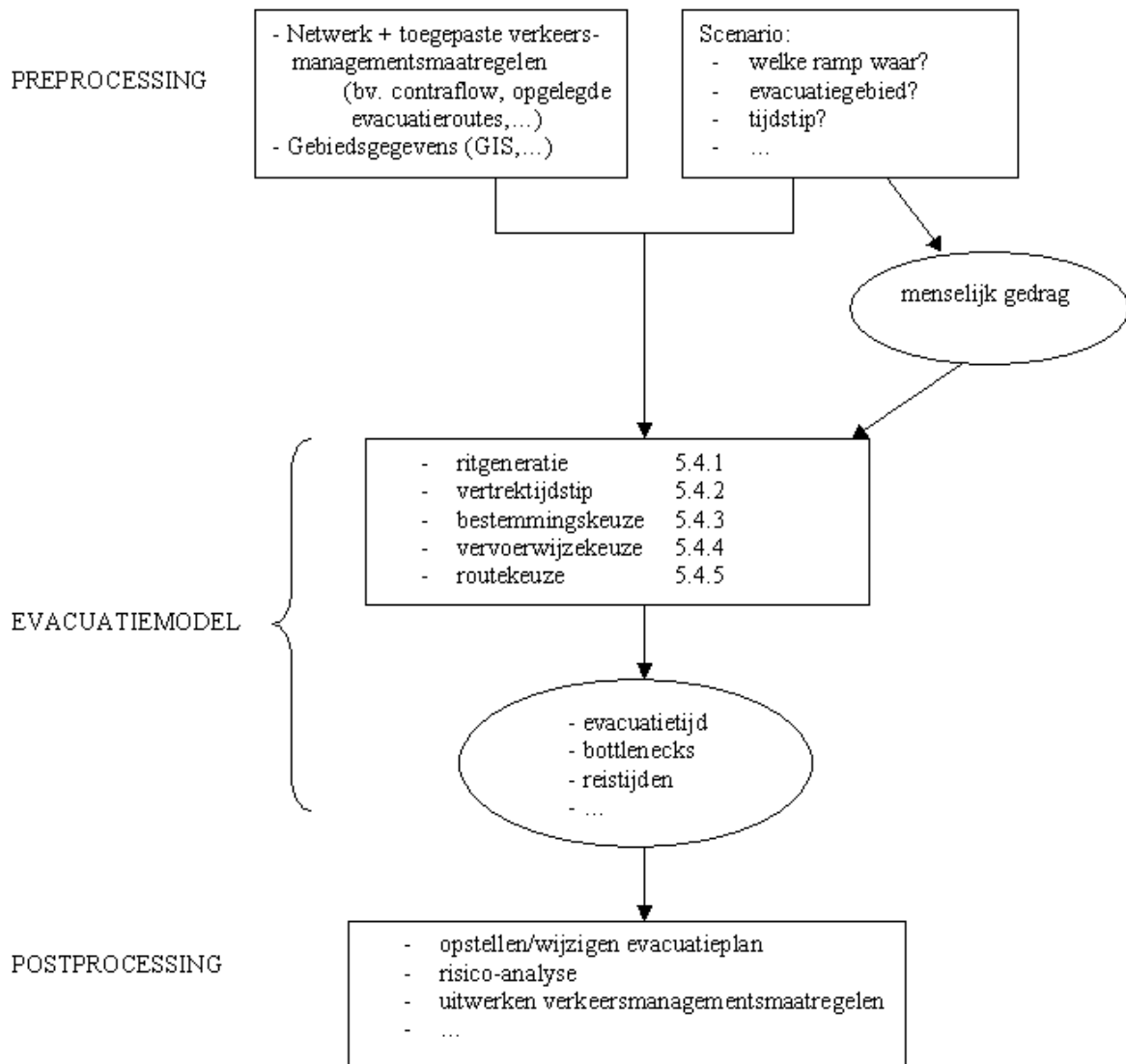
In de vorige paragraaf werd opgesomd waarvoor een evacuatiemodel gebruikt kan worden. Dit vereist, naast de (verkeers)modellering zelf, echter steeds een preprocessing en een post-processing.

In de *preprocessing* selecteert de analist het te bestuderen scenario: over welk soort ramp gaat het? Waar en wanneer doet deze ramp zich voor? Wat is het te evacueren gebied?

Naast de selectie van het scenario dienen ook de vereiste gegevens ingevoerd. Zo moet het verkeersnetwerk beschreven worden en moeten gegevens verzameld worden over de bevolking in het evacuatiegebied (aantal inwoners, ruimtelijke spreiding, ...). GIS-databanken kunnen hierbij een grote hulp betekenen.

Al deze gegevens, samen met een veronderstelling i.v.m. het menselijk gedrag, vormen dan de invoer voor het evacuatiemodel zelf. Het menselijk gedrag zal op zijn beurt ook afhangen van het bestudeerde scenario.

De uitvoer van het evacuatiemodel geeft informatie over de totale evacuatietijd, de bottlenecks, de individuele reistijden, enz. Niet alle modellen geven echter waarden van al deze grootheden. Men kan hier onderscheid maken tussen geaggregeerde (bv. totale evacuatietijd) en gedisaggregeerde grootheden (bv. individuele reistijden per huishouden). De eerste groep geeft een goed beeld van de algemene werking van een evacuatieplan, de tweede laat toe om de ruimtelijke variatie van de verwachte evacuatietijd vast te stellen. Die ruimtelijke variatie wordt best in rekening gebracht bij de beoordeling van een evacuatieplan: een huishouden wordt immers het meest aan het gevaar blootgesteld terwijl het zich in de auto bevindt.



Figuur 5.1: Algemeen kader van het modelleren van evacuaties

Op basis van de output van het evacuatiemodel kan dan de *postprocessing* uitgevoerd worden. Hier komt het nut en het belang van het modelleren van evacuaties tot uiting. Om de evacuatieplannen te optimaliseren kan men iteratief te werk gaan en bv. met de nieuw ontworpen verkeersmanagementsmaatregelen als invoer de drie stappen opnieuw uitvoeren.

In figuur 5.1 wordt dit geschetste kader schematisch weergegeven. Op die figuur staat ook aangegeven waar in de tekst een en ander verder wordt uitgewerkt.

5.3 Modelleren van verkeer voor “gewone” situaties en voor evacuaties: vergelijking

Traditionele verkeersmodellen werden ontwikkeld voor planning op lange termijn in situaties waar de herkomsten en bestemmingen vastliggen en gemakkelijk kunnen bepaald worden en waar enkel de spitsuren dienen beschouwd te worden. In contrast daarmee is een evacuatie bij een ramp van nature uit een ongeordend proces. Het betreft meestal de verplaatsing van een groot aantal personen naar bestemmingen die moeilijk te bepalen zijn. Er is dus nood aan verkeersmodellen die specifiek zijn ontworpen voor *emergency management*. In deze paragraaf plaatsen we beide soorten modellen naast mekaar.

5.3.1 Het traditionele verkeersmodel

Het traditionele macroscopische verkeersmodel, meestal het vierstapsmodel genoemd, zoals beschreven in Immers & Stada (1998), heeft tot doel het evenwicht te bepalen bij een gegeven toestand van het activiteitensysteem (d.i. het geheel van sociale, economische en politieke activiteiten) en het transportsysteem (het geheel van infrastructuur, vervoermiddelen, transportdiensten, openbare vervoersdiensten, ...). Het berekende evenwicht bestaat concreet uit de omvang en de verdeling van de transportstromen over de verschillende schakels van het beschouwde verkeersnetwerk. Op basis daarvan kan men dan testen of onderzoeken welke de optimale toekomstige ruimtelijke ontwikkeling is, bv. waar er best nieuwe infrastructuur wordt aangelegd of waar best woongelegenheden en werkgelegenheden worden ontwikkeld.

De met het traditionele verkeersmodel te bepalen verkeersbelasting komt tot stand als gevolg van een reeks individuele keuzes, nl. het al dan niet maken van een verplaatsing, het vertrektijdstip, de bestemming, de vervoerwijze en de route.

Samengevat werkt het traditionele verkeersmodel als volgt. Men verdeelt het beschouwde gebied op in een aantal zones en men schematiseert het wegennetwerk als knopen die onderling verbonden worden met schakels. Daarna bepaalt men aan de hand van het eerste submodel, het *productie/attractiemodel*, per zone het totaal aantal verplaatsingen dat door die zone enerzijds wordt geproduceerd en anderzijds wordt aangetrokken. Met het tweede submodel, het *distributiemodel*, gaat men de verplaatsingen met als herkomst zone x verdelen over de verschillende bestemmingen en omgekeerd. Het resultaat wordt weergegeven in een HB-matrix (Herkomst-Bestemmingsmatrix). Deze matrix kan dan nog verder opgesplitst worden over verschillende vervoerwijzen, na toepassing van het *vervoerwijzekeuzemodel*. Het vierde en laatste submodel, het *toedelingsmodel*, komt neer op de bepaling van de routekeuze. De verplaatsingen in de HB-matrix worden toegedeeld aan de verschillende mogelijke routes tussen een herkomst en een bestemming. Het resultaat van deze stap zijn dus de vervoersstromen over de schakels in het netwerk.

5.3.2 Verkeersmodellen voor evacuaties

Wanneer we nu het verkeer bij grootschalige evacuaties wensen te modelleren, dienen we uiteraard rekening te houden met het specifieke karakter van zulke evacuaties. Alleen al door het afwijkend menselijk gedrag moeten er bij het modelleren andere aannames gemaakt worden in vergelijking met “normale” situaties.

De analyse en modellering van het verkeersluik van evacuaties is gebaseerd op een evaluatie van het aanbod aan infrastructuur (bv. hoeveel verhoogt de capaciteit voor het evacuerende verkeer door toepassing van contraflow?) enerzijds en van de verkeersvraag anderzijds. Het optredende tijds- en ruimteprofiel van de verkeersvraag (hoeveel wagens vertrekken wanneer en waar?) volgt rechtstreeks uit het menselijke gedrag bij evacuaties. Net omdat het bij de extreem grote verkeersvraag cruciaal is de tijdsafhankelijke verkeersvraag zo goed mogelijk in te schatten, is het van groot belang het menselijke gedrag zo goed mogelijk te voorspellen. De studie van dat menselijk gedrag in rampsituaties is echter een onderzoeksdomein op zich. In Alsnih & Stopher (2004) wordt een beknopt overzicht gegeven van allerlei studies hieromtrent. Een aantal facetten kwamen reeds eerder in de tekst aan bod, zoals bijvoorbeeld de schaduwevacuaties (zie paragraaf 3.2.4) en het “crying wolf”-syndroom (zie paragraaf 3.2.3). Ook verder in de tekst zullen, indien nodig, nog een aantal elementen aan bod komen. Voor verdere informatie en referenties verwijzen we naar Alsnih & Stopher (2004), Murray & Mahmassani (2003, p. 2-3), Kalfsbeek (2004, p. 30-31) en Urbanik II (2000, p. 177).

Net zoals in normale omstandigheden is het verkeerspatroon het resultaat van een reeks keuzes die elk individu (of huishouden) maakt. De keuzes die moeten gemaakt worden zijn dezelfde als in normale omstandigheden: vertrektijdstip, vervoerwijze, enz. Welke beslissingen er dan precies genomen worden, wordt bepaald door het individuele gedrag.

Het is dan ook niet verwonderlijk dat het modelleren van evacuaties, geheel analoog aan het traditionele verkeersmodel, gebeurt aan de hand van een aantal submodellen die elke een stap in het keuzeproces trachten te beschrijven. Meer bepaald zijn dit de stappen (Cova & Johnson (2002, p. 2212); Alsnih & Stopher (2004, p. 7)):

- **Ritgeneratie** (*trip generation*): schatten van het aantal voertuigen dat zich op het verkeersnetwerk zal begeven. Ook de ruimtelijke verdeling van dit totaal aantal voertuigen over de verschillende “origin nodes” (de knopen in het geschematiseerde verkeersnetwerk waar het verkeer het netwerk oprijdt) dient bepaald.

Bij evacuaties gelden er in vergelijking met normale omstandigheden heel andere drijfveren om een verplaatsing al dan niet te maken. Invloedsfactoren zijn nu eerder de ervaring en inschatting van het risico, het geloof in de evacuatieoproep, het bestaan van een evacuatieplan en de familiale context (Alsnih & Stopher, 2004, p. 4). In het traditionele verkeersmodel daarentegen wordt de productie van verplaatsing bepaald op

basis van sociaal-economische factoren, zoals grondgebruik, samenstelling en inkomen van de huishoudens, enz. Uiteraard zal in beide gevallen de bevolkingsdichtheid een grote rol spelen.

- **Vertrektijdstip** (*departure timing*): schatten van het debiet waarmee de voertuigen zich op het netwerk zullen begeven. Het komt dus neer op het opstellen van een tijdsprofiel van de vraag naar verplaatsingen. Bij evacuaties en de erbij horende extreem grote verkeersvraag is dat tijdsprofiel van groot belang voor de verkeersafwikkeling en dient dit dus apart gemodelleerd te worden. Bij het traditionele verkeersmodel daarentegen zit de keuze van het vertrektijdstip impliciet in het productie/attractiemodel, aangezien dit het aantal verplaatsingen bepaalt voor een vooraf bepaalde periode, bv. de ochtendspits.
- **Bestemmingskeuze** (*destination choice*): toekennen van een bestemming aan elk voertuig. De mogelijke bestemmingen zijn uitgangen van de evacuatiezone of schuilplaatsen in de evacuatiezone zelf. Net zoals bij het traditionele verkeersmodel wordt de bestemmingskeuze bepaald op basis van de weerstand of het gemak waarmee de bestemming kan worden bereikt. Toch is er een verschil op te merken. In normale omstandigheden heeft elke verplaatsing een welbepaald doel en dus een welbepaalde bestemming, zoals bv. de school of de werkplaats. Bij evacuaties echter is het doel van de verplaatsing enkel het zich begeven naar een veiligere plaats, hetzij buiten het bedreigde gebied, hetzij in een schuilplaats. Er zijn m.a.w. verschillende bestemmingen mogelijk om hetzelfde doel (veiligheid) te bereiken.
- **Vervoerwijzekeuze** (*modal split*): bepalen van de gebruikte vervoersmode. Ook hier is er een aanzienlijk verschil tussen evacuaties en normale situaties. Men kan namelijk aannemen dat elk huishouden dat een auto bezit die ook zal gebruiken om te evacueren. Personen die een andere mode dan de auto kiezen, zijn hiertoe dus gedwongen: huishoudens zonder auto, bejaarden, ... Men zal voor deze laatste groep mensen speciale voorzieningen treffen, zoals het organiseren van speciaal busvervoer (zie paragraaf 3.3.4). De vervoerwijzekeuze kan bijgevolg vrij direct bepaald worden.

Het bepalen van het *aantal* voertuigen dat elk huishouden zal gebruiken, maakt deel uit van het eerste submodel, het ritgeneratiemodel.

- **Routekeuze** (*route choice*): toedelen van het verkeer aan de verschillende links. Wat betreft het modelleren van de routekeuze zijn er minder verschillen waar rekening mee gehouden worden. De route die mensen kiezen om van herkomst naar bestemming te rijden, is afhankelijk van de ervaren weerstand (bv. reistijd). Bij evacuaties is het wel mogelijk dat heel wat evacuatielinks op voorhand reeds bepaald werden in de rampen- en evacuatieplannen en de routekeuze dus niet geheel vrij is. Tenslotte is het eveneens mogelijk dat men door de specifieke bedreiging of door de ontstane paniek

plots routes gaat gebruiken die men in normale omstandigheden nooit zou gebruiken, zoals landwegen (Church & Sexton (2002, p. 9); Sisiopiku *et al.* (2004, p. 45)).

Concluderend kunnen we stellen dat qua algemene opbouw en onderverdeling in submodellen het modelleren van verkeer in normale omstandigheden en bij evacuaties analoog verloopt. Wel is het zo dat het relatief belang van een bepaald submodel in beide situaties kan verschillen, bv. wat betreft het vertrektijdstip en de vervoerwijzekeuze. Ook de concrete uitwerking van de submodellen zal verschillend zijn tengevolge van een verschil in invloedsfactoren en menselijk gedrag. Dit wordt uitgewerkt in de volgende paragraaf, waar verder wordt ingegaan op de vijf submodellen.

Een ander opmerkelijk verschil is de beschikbaarheid aan data om de modellen te calibreren en te valideren. Gewoon al omdat een evacuatie een zeldzame gebeurtenis is, zijn er weinig verkeersgegevens beschikbaar. De vooruitgang op het gebied van ITS (zie paragraaf 3.3.2) biedt hier wel enige perspectieven, maar de dataset ter calibratie en validatie van de modellen zal steeds beperkt zijn.

5.4 Uitwerking submodellen

In deze paragraaf gaan we op basis van een literatuurstudie na hoe de vijf submodellen kunnen worden uitgewerkt.

5.4.1 Ritgeneratie

Bij het ritgeneratiemodel komt het erop aan de totale verkeersvraag te bepalen, d.i. het totaal aantal voertuigen dat zal evacueren.

Een eerste stap is steeds het definiëren van de evacuatiepopulatie. Deze bestaat uit een aantal groepen (Barrett *et al.*, 2000, p. 15):

- inwoners van het evacuatiegebied die zich in hun woning bevinden op het ogenblik van de oproep tot evacuatie;
- inwoners van het evacuatiegebied die zich binnen of buiten dat gebied bevinden, maar eerst naar huis moeten terugkeren en dan met het hele huishouden samen evacueren. Het is duidelijk dat deze groep zeer beperkt is bij bv. een nucleaire ramp, terwijl ze wel omvangrijk kan zijn bij orkaanevacuaties;
- niet-inwoners die zich in het evacuatiegebied bevinden op het ogenblik van de oproep, dit voor school- of werkverplichtingen of voor vrijetijdsactiviteiten;
- personen die zich in de wagen op het verkeersnetwerk van het gebied bevinden bij de start van de evacuatie.

Andere indelingen, zoals bijvoorbeeld in Urbanik II (2000, p. 168-169) zijn mogelijk, maar komen op hetzelfde neer.

De totale verkeersvraag is echter niet zomaar gelijk aan de som van deze verschillende groepen. Zo wordt de verkeersvraag nog verder verhoogd door het doorgaand verkeer, dit is het verkeer dat zich op het ogenblik van de oproep buiten het gebied bevindt, maar die door het gebied wensen te reizen, voor zover dit toegelaten wordt uiteraard. Het is duidelijk dat dit doorgaand verkeer de verkeersafwikkeling van de evacuatie van de eigenlijke evacuatiebevolking sterk kan bemoeilijken.

Ook moet er rekening mee gehouden worden dat een gezin zich eerst verenigt (bv. kinderen afhalen op school) en dan als één geheel het evacuatiegebied verlaat. In Murray & Mahmassani (2003) wordt getracht dit fenomeen op een theoretische manier te kwantificeren. Eerst wordt de locatie van samenkomst bepaald, daarna in welke volgorde (volgens welk traject) bv. de kinderen worden afgehaald. De basis van de voorgestelde theorie is het benaderen van het tweede deelprobleem, de trajectbepaling, als een variant op het klassieke “*vehicle routing problem*”.¹ In een vervolgstudie (Murray-Tuite & Mahmassani, 2004) concludeert men op basis van een aantal rekenexperimenten dat het effect sterk kan verschillen afhankelijk van de situatie die men beschouwt, maar dat het mogelijks nodig is de oorspronkelijke vraag (d.i. deze zonder inrekenen van voormeld fenomeen) te verhogen met 50%. Desalniettemin wordt met dit fenomeen in nagenoeg geen enkele andere studie rekening gehouden, wat blijkbaar toch tot aanzienlijke onderschattingen van de vraag kan leiden.

De meest gebruikte methode om de verkeersvraag te bepalen, is het schatten van de **participation rate**, d.i. het percentage van de bevolking in het evacuatiegebied dat daadwerkelijk gevolg geeft aan de oproep tot evacuatie. Men deelt het evacuatiegebied op in een aantal zones en voor elke zone bepaalt men de participation rate. De ruimtelijke verdeling van de verkeersvraag wordt dan bekomen door vermenigvuldiging van de participation rate met het bevolkingsaantal in de respectievelijke zone. Er moet hierbij wel rekening gehouden worden met een sterke tijdsafhankelijkheid zowel van de participation rate als van de aanwezige bevolking. De participation rate moet dus bepaald worden voor een aantal tijdstippen (bv. ’s middags, ’s avonds, ...), maar ook voor een aantal scenario’s. De participation rate is nl. veel hoger voor bv. rampen met giftige gaswolken dan voor orkanen, waarschijnlijk t.g.v. een verschil in onzekerheid wat betreft effectieve blootstelling aan het gevaar (Alsnih & Stopher, 2004, p. 4). Zoals reeds gezegd in paragraaf 3.2.4 speelt ook het type van de evacuatieoproep

¹Gegeven een aantal klanten, geografisch verspreid, met een bepaalde vraag naar goederen. In het centraal depot beschikt men over een aantal vrachtwagens om de gevraagde goederen te leveren. Het vehicle routing problem bestaat er dan in de trajecten van de verschillende vrachtwagens te bepalen, rekening houdend met hun laadvermogen, zodanig dat de distributie van de gevraagde goederen wordt verwezenlijkt met een minimale totale kost voor de vloot vrachtwagens.

(vrijwillig, aanbevolen of verplicht) en de categorie van orkaan een rol.

Het geschatte aantal *personen* dat zal evacueren, wordt in een volgende stap vertaald naar een aantal *voertuigen*, door het inrekenen van een, eveneens te schatten, waarde van de bezettingsgraad, uitgedrukt in aantal personen per voertuig. Ook voor deze variabele is de range van mogelijke waarden zeer groot. Men kan dit probleem ook benaderen op een andere manier: als “evacuatie-eenheid” beschouwt men niet één persoon, maar wel één huishouden. Er wordt dan een schatting gemaakt van het gemiddelde voertuiggebruik per huishouden (hoeveel auto’s gebruikt een huishouden voor de evacuatie?) ofwel van het gebruikte percentage van het aantal voertuigen dat een huishouden ter beschikking heeft. Deze laatste mogelijkheid vereist dan wel dat men over gegevens beschikt van het voertuigbezit per huishouden. In Urbanik II (2000, p. 169) spreekt men als richtwaarde voor het gemiddeld voertuiggebruik van 1,3 vtg/huishouden, hetgeen in die studie overeenkwam met een gebruik van 52 % van het aantal beschikbare voertuigen. In FEMA (2001, p. 14) spreekt men eerder over percentages tussen 65 % en 75 %. In van Noortwijk & van Maarseveen (2002) neemt men aan dat alle beschikbare voertuigen ingezet worden, omdat iedereen zijn voertuigen ook in veiligheid wil brengen.

Een alternatief dat door een aantal auteurs werd gebruikt, is **logistische regressie**. Een beknopt overzicht wordt gegeven in Fu (2004, p. 9). Dit regressiemodel is van de vorm (Wilmot & Mei, 2003, p. 5):

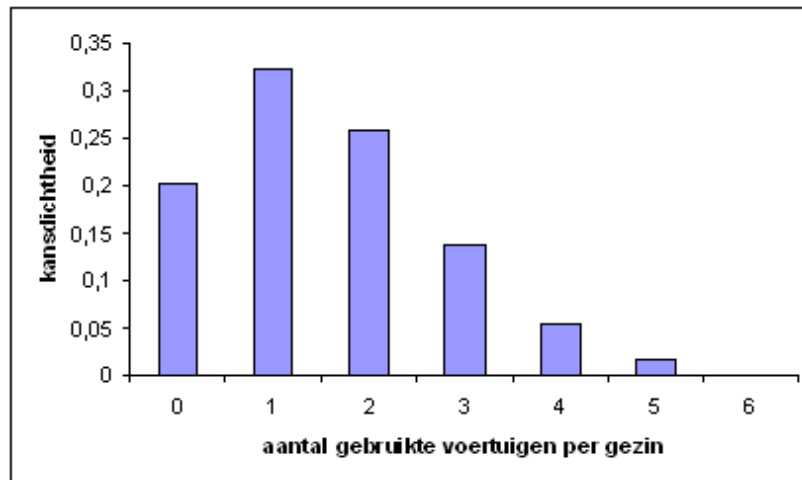
$$y = \frac{e^{(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n)}}{1 + e^{(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n)}} \quad (5.1)$$

waarin:

- y : afhankelijk variabele, nl. de kans dat een huishouden evacueert
- x_1, x_2, \dots, x_n : onafhankelijke variabelen
- $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$: parameters

Eerste kritiek punt bij deze methode is het selecteren van de juiste variabelen, m.a.w. de eigenschappen van het huishouden en andere factoren die bepalend zijn voor hun evacuatiegedrag. Zoals duidelijk blijkt uit het overzicht van Fu (2004) worden sommige variabelen in de ene studie als significant gekwalificeerd, terwijl dezelfde variabelen volgens een andere studie als niet-significant, d.w.z. $\beta \approx 0$. Vaak vernoemde variabelen zijn: leeftijd, gezinssituatie, opleiding, inkomen, perceptie van het gevaar, aanwezigheid van huisdieren, ervaring met voorgaande evacuaties, enz. Om de functionaliteit van het model niet te beperken, is het uiteraard nodig dat men over gegevens kan beschikken van de geselecteerde variabelen en dat men in staat is ze enigszins te voorspellen.

Tweede stap is dan het calibreren van het regressiemodel, d.w.z. het schatten van de coëfficiënten β_i zodanig dat de voorspellingen van dat model zo goed mogelijk overeenstemmen met



Figuur 5.2: Poissonverdeling

het waargenomen gedrag. Aangezien men werkt met een gedisaggregeerd regressiemodel (men bekijkt huishouden per huishouden) en de afhankelijk variabele y een willekeurige waarde tussen 0 en 1 kan aannemen, dient echter nog een andere parameter van het model gecalibreerd. Een huishouden evacueert namelijk wel ($y = 1$) ofwel niet ($y = 0$). Daarom is het nodig de optimale waarde van het kantelpunt of “*cut-off point*” te bepalen. Bijvoorbeeld in Wilmot & Mei (2003, p. 8) had dit kantelpunt als waarde 0,36. Als het regressiemodel een kans dat het huishouden evacueert voorspelt kleiner dan 0,36 dan wordt besloten dat desbetreffend huishouden niet evacueert.

Tenslotte vermelden we hier nog dat het feit dat de afhankelijk variabele y een dichotome variabele is er juist toe leidt dat er i.p.v. de (gebruikelijke) lineaire regressie een logistische regressievergelijking wordt gehanteerd.

In Cova & Johnson (2002) hanteert men ter bepaling van de verkeersvraag een **stochastische methode**. Vertrekpunt is de aanname van een Poissonverdeling van het aantal voor de evacuatie gebruikte voertuigen per gezin.

Er wordt beargumenteerd dat deze (rechtsscheve) kansverdeling de meest toepasselijke is, omdat er inderdaad een aantal gezinnen zijn zonder voertuig, de meeste 1 of 2 auto’s gebruiken en er minder gezinnen zijn met 3 auto’s of meer. Cruciaal is hier de bepaling van het gemiddelde en de variantie, die aan mekaar gelijk zijn bij een Poissonverdeling. Deze variëren naargelang het tijdstip van de dag en het beschouwde scenario. In figuur 5.2 wordt bij wijze van voorbeeld een Poissonverdeling met een gemiddelde van 1,6 weergegeven. Eenmaal de kansverdeling volledig bepaald, wordt voor elk huishouden apart het aantal gebruikte voertuigen geloot m.b.v. een aan de opgestelde kansverdeling aangepaste Poisson randomgenerator. Loting voor alle huishoudens in een zone leidt dan automatisch tot de totale verkeersvraag in

die zone. Deze laatste stap wordt gedaan om de onzekerheid, die in realiteit sowieso bestaat, in te bouwen in het model.

In Mei (2002) worden **artificiële neurale netwerken** (ANN) gebruikt om de verkeersvraag in te schatten. Er worden drie verschillende neurale netwerk-modellen getest (Mei, 2002, p. 49-60). Het zou ons te ver leiden deze in detail te behandelen. Een ANN is een techniek om informatie te verwerken, gebaseerd op de werking van de hersenen. In tegenstelling tot de gebruikelijke algoritmische aanpak, kan een ANN niet geprogrammeerd worden om een specifieke taak uit te voeren. Een ANN heeft wel de opmerkelijke eigenschap om inzicht te verwerven in complexe of niet-precieze data en is dus uiterst geschikt om patronen en trends te detecteren die eigenlijk te complex zijn om opgemerkt te worden door de mens of door andere computertechnieken. Een ANN moet daarom eerst “getraind” worden door het te confronteren met een bepaalde dataset. Eenmaal getraind kan het ANN dan bekeken worden als een “expert” in de categorie van informatie die het ter analyse voorgeschoteld kreeg en kan het een aantal voorspellingen doen en antwoord geven op “Wat indien?”-vragen.

Uit het voorgaande volgt dat ANN inderdaad kunnen ingezet worden om de verkeersvraag te bepalen. Daarenboven hebben ANN niet te kampen met een aantal problemen die inherent zijn aan regressiemodellen, zoals multicollineariteit en de aanname van een bepaalde wiskundige vorm. Een ANN maakt immers geen enkele veronderstelling over een gekende mathematische functionele vorm en kent dus een veel grotere vrijheid om de data te analyseren.

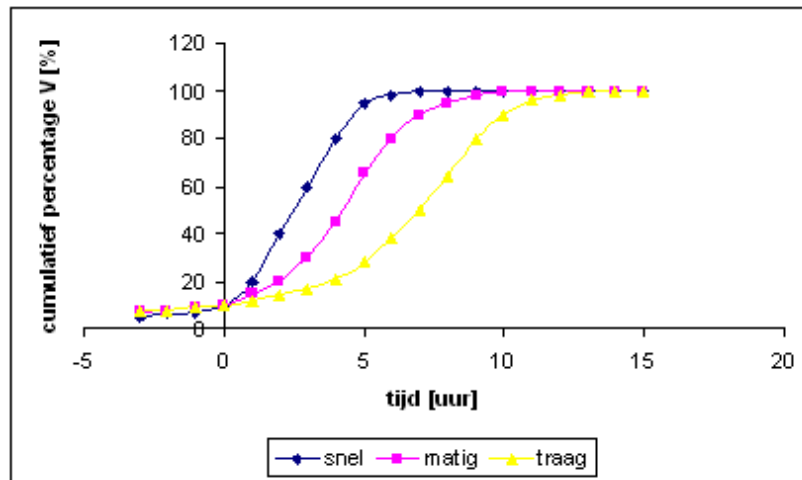
In diezelfde referentie, Mei (2002) (waarvan Wilmot & Mei (2003) trouwens een synthese is), worden zowel een participation rate-model, een logistisch regressiemodel en drie vormen van ANN getest en vergeleken. Er wordt geconcludeerd dat ANN en logistische regressie betere resultaten geven dan het gebruik van een participation rate, maar dat het verschil relatief klein is. Daarenboven geeft men aan dat het opstellen van het regressiemodel en zeker de ANN veel arbeidsintensiever en tijdrovender is.

5.4.2 Vertrektijdstip

Uit de vorige stap volgt de totale verkeersvraag. Het zou echter niet realistisch zijn te veronderstellen dat deze vraag niet gespreid wordt in de tijd. Zeker bij de grote verkeersvraag die met evacuatie gepaard gaat, is het belangrijk de verdeling van de vraag over de tijd juist in te schatten.

We bekijken enkel het vertrektijdstip t.o.v. het ogenblik waarop de bevolking wordt opgeroepen te evacueren. Wanneer er juist tot evacuatie moet opgeroepen worden, stelt weliswaar een aantal problemen (zie paragraaf 3.2.3), maar deze laten we hier buiten beschouwing.

Traditioneel wordt, zeker wanneer de totale vraag bepaald werd met participation rates, het



Figuur 5.3: S-curven als responscurve

tijdsprofiel van de vraag weergegeven aan de hand van *response curves*, ook wel *loading curves* of *mobilization curves* genoemd. Deze curve geeft het cumulatieve percentage weer van de reeds vertrokken voertuigen in functie van de tijd.

Meest gebruikt zijn de drie **S-curven** uit figuur 5.3 (Mei (2002, p. 11)), gebaseerd op waarnemingen bij een aantal orkaanvacuaties. Het tijdstip $t = 0$ komt overeen met de evacuatieoproep. Dat deze curves in deze vorm inderdaad enkel bruikbaar zijn voor evacuaties bij orkanen, is af te leiden uit het feit dat een deel van de bevolking reeds evacueert voor de eigenlijke oproep, bijvoorbeeld schaduwvacuaties. Bij rampen met een onvoorspelbaar karakter zal dit fenomeen niet optreden, waardoor de curves zullen aangepast moeten worden. Verder zien we dat er nog keuze is tussen een snelle, matige of trage respons bij de bevolking. Afhankelijk van de omstandigheden (het scenario) zal, op een enigszins subjectieve manier, één van de drie curves geselecteerd moeten worden.

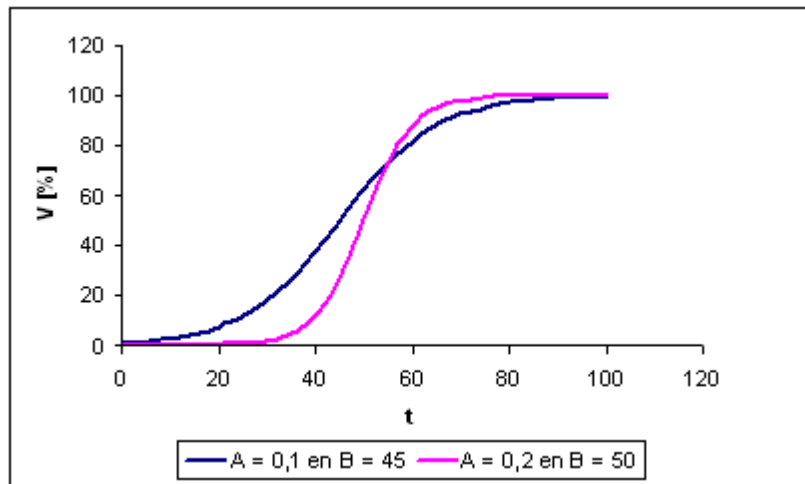
In de literatuur wordt steeds aangenomen dat de mobilisatie traag op gang komt, daarna steeds sneller en sneller verloopt, om daarna terug af te nemen. Deze aanname, die overigens bevestigd wordt door de waarnemingen, leidt inderdaad tot een S-vormige curve.

Een aantal auteurs hebben getracht dit in een wiskundige vorm te gieten. Meest voor de hand liggend is het gebruik van een **logistische curve** (Hobeika & Kim (1998, p. 194); Radwan *et al.* (1985, p. 24)), die bepaald wordt door de betrekking:

$$V(t) = \frac{1}{1 + e^{-A(t-B)}} \quad (5.2)$$

waarin:

- V: cumulatief percentage van de totale vraag



Figuur 5.4: Logistische curve

- t: tijd
- A en B: parameters van de logistische curve

Om rekening te houden met de te verwachten respons (snel-traag), kan men de waarde van A wijzigen. De *half loading time* B is het tijdstip waarop 50% van de totale verkeersvraag zich op het verkeersnetwerk heeft begeven. De waarde van B kan gewijzigd worden om rekening te houden met de ernst en dreiging van de ramp. In figuur 5.4 worden kwalitatief twee voorbeelden, met verschillende waarden van A en B, van zulke logistische curve getoond.

Andere wiskundige formuleringen zijn uiteraard mogelijk, maar worden minder toegepast. We vermelden hier enkel nog het voorstel van Tweedie *et al.* (1986), die waargenomen data benaderen met een **Rayleigh** kansverdelingsfunctie en zo komen tot de uitdrukking (met t uitgedrukt in minuten):

$$V(t) = 1 - \exp\left(\frac{-t^2}{T}\right) \quad (5.3)$$

waarbij T overeenkomt met het tijdstip waarop alle voertuigen vertrokken zijn.

In Cova & Johnson (2002) wordt, net zoals voor de totale vraag, een **stochastische methode** gehanteerd ter bepaling van het tijdsprofiel. Het principe is exact hetzelfde als bij de bepaling van de totale vraag: aanname van een Poissonverdeling voor de vertrektijden, bepaling van het gemiddelde en loting van het vertrektijdstip van elk huishouden apart. Ook hier wordt deze laatste stap, die realisatie genoemd wordt, uitgevoerd om enige onzekerheid in te bouwen.

In Urbanik II (2000) wordt het vertrektijdstip bepaald door de *trip generation time* (TGT), d.i. het tijdsinterval tussen het verspreiden van de evacuatieoproep en het vertrek, op te splitsen in een aantal componenten en voor deze componenten afzonderlijk een schatting te doen.

De beschouwde componenten zijn: ontvangen van de oproep, voorbereiden om het werk te verlaten, terugkeren van het werk naar huis en voorbereiden om het huis te verlaten. De TGT van een bepaald huishouden is simpelweg de som van de tijdsduur van elke activiteit afzonderlijk. Het is mogelijk dat een aantal componenten geen tijd vergen, bijvoorbeeld wanneer men de evacuatieoproep thuis ontvangt en niet op het werk. Voor elke activiteit wordt dan een cumulatieve kansfunctie opgesteld, die in functie van de tijd aangeeft welk percentage van de bevolking desbetreffende activiteit heeft beëindigd. Het tijdsprofiel van de totale TGT wordt dan bepaald door te stellen dat de kansverdelingen van de verschillende activiteiten onafhankelijk zijn van mekaar én dat een kansverdeling van een bepaalde activiteit voorwaardelijk is t.o.v. die van een volgende. Om de cumulatieve kansverdeling van de totale TGT dan te kennen, mogen de kansverdelingen van de afzonderlijke activiteiten dan vermenigvuldigd worden met mekaar. Voor een uitgewerkt voorbeeld verwijzen we naar Urbanik II (2000, p. 174-175).

In Fu & Wilmot (2004) en Fu (2004) wordt in tegenstelling tot al het voorgaande gesteld dat de beslissing om al dan niet te evacueren en de beslissing wanneer te vertrekken gelijktijdig worden genomen. Elk huishouden bekijkt herhaaldelijk de situatie en evalueert telkens de omstandigheden. Deze evaluatie komt neer op het vergelijken van het (door dat huishouden zo gepercipieerde) nut van thuis te blijven met het nut van te evacueren. Elke keer wordt beslist om niet te evacueren, tot wanneer een bepaalde drempel in de evaluatie wordt overschreden. Op dat moment beslist het huishouden wanneer het de woning zal verlaten. Dit proces wordt in voornoemde referenties dan gemodelleerd met een sequentieel logitmodel en met een “*survival analysis*”-model.

Bij het sequentiële logitmodel wordt het keuzeprocess voorgesteld als een opeenvolging van keuzes in de tijd. Zolang in het vorige tijdsinterval een huishouden heeft beslist om niet te evacueren, zal dat huishouden in het volgend tijdsinterval (in een volgende sequentie) opnieuw voor de keuze komen te staan. Via de theorie achter het sequentiële logitmodel komt men dan zo tot de bepaling van de kans dat een huishouden in een bepaald tijdsinterval beslist om te evacueren. Daaruit kan dan de tijdsafhankelijke vraag worden afgeleid.

Het andere model dat werd getest, is gebaseerd op “*survival analysis*”, ook wel “*duration analysis*” genoemd. Dit is een statistische procedure die zogenaamde “*time-to-event*”-data analyseert. Voor verdere details en de precieze uitwerking van beide modellen verwijzen we naar Fu (2004). Meer algemene informatie over logitmodellen is te vinden in Immers & Stada (1998, p. 21-36).

Tot slot wensen we nogmaals te wijzen op het grote belang van de verdeling van het vertrektijdstip. Indien de totale vraag quasi zonder enige spreiding zich op het verkeersnetwerk zou begeven, kan dit de evacuatietijd sterk doen verhogen. Het kan nodig zijn de evacuatie gefaseerd i.p.v. simultaan te laten verlopen. We gaan verder in op deze keuze in paragraaf B.10.2.

5.4.3 Bestemmingskeuze

Het doel van de verplaatsing bij een evacuatie is zich te begeven naar een veiligere plaats. Deze plaats kan zich zowel binnen het evacuatiegebied (schuilplaatsen) als daarbuiten (familie of vrienden, hotels, schuilplaatsen) bevinden. Aangezien meestal enkel de verkeersafwikkeling binnen het evacuatiegebied bestudeerd wordt, beperken de te beschouwen mogelijke bestemmingen zich tot de interne schuilplaatsen en de uitgangen of “*exit points*” van het evacuatiegebied. Een individu zal bij zijn bestemmingskeuze de door hem waargenomen kosten of weerstand minimaliseren. Deze weerstand bestaat uit volgende componenten (Barrett *et al.*, 2000, p. 9): reistijd, afstand, tijd nodig om veiliger gebied te bereiken, beschikbaarheid van verblijfplaats en/of openbare hulpverlening en verblijfskosten.

Het modelleren van de bestemmingskeuze kan gebeuren op een deterministische of probabilistische manier (Cova & Johnson, 2002, p. 2217-2218). Andere en meer gedetailleerde indelingen worden gegeven in Alsnih & Stopher (2004, p. 9) en Mei (2002, p. 16). De daar aangegeven verschillende mogelijkheden worden hier verwerkt in de verdeling in deterministische en probabilistische methodes.

Een eerste deterministische methode is het veronderstellen dat de evacués zich begeven naar de dichtstbijzijnde mogelijke bestemming. Bijvoorbeeld in Hobeika & Kim (1998) neemt men aan dat de evacués de kortste routes kiezen om het bedreigde gebied te verlaten. De in Chen (2003) gehanteerde methode leunt hier dicht bij aan. Men definieert de bestemming namelijk als de uitgang die voor het huishouden de kleinste reistijd vergt in free flow condities.

De tweede deterministische methode is het aannemen dat de evacués vooraf gedefinieerde bestemmingen opzoeken, in overeenstemming met een bestaand evacuatieplan. Het is duidelijk dat dit enkel mogelijk is indien er een gedetailleerd en voldoende door de bevolking gekend evacuatieplan bestaat.

In tegenstelling tot de voorgaande deterministische methodes, houden de probabilistische methodes er rekening mee dat de evacués zich in realiteit meer verspreiden. De deterministische methoden voorspellen namelijk dat iedereen uit eenzelfde zone dezelfde bestemming zal selecteren. De probabilistische methodes houden dan in mindere of meerdere mate rekening met een zekere dispersie. Factoren die hierbij in rekening gebracht kunnen worden, zijn enerzijds

de woonplaats van familie of vrienden en karakteristieken van de (dreigende) ramp en anderzijds de verkeersstoestand op het ogenblik van evacuatie. Deze methodes zijn realistischer, zeker voor orkaanevacuaties, maar zijn meer gecompliceerd aangezien de invloedsfactoren een niet te verwaarlozen onzekerheid met zich meebrengen.

5.4.4 Vervoerwijzekeuze

Zoals reeds gezegd zal een huishouden dat een wagen bezit die gebruiken voor de evacuatie. Zij die een andere vervoerwijze kiezen dan de auto zijn daartoe gedwongen. Het gaat dan enerzijds om huishoudens die geen auto bezitten en anderzijds om de personen in instellingen zoals bejaardentehuizen, gevangenis, scholen, . . . Het is echter wel mogelijk dat een aantal personen zonder auto worden afgehaald door familie of vrienden en dan toch met de auto evacueren.

De modellering van de vervoerwijzekeuze komt bijgevolg neer op het schatten van het aantal personen die ertoe gedwongen zijn een andere vervoerwijze dan de auto te kiezen. Meestal betreft het speciale busdiensten die de overheid inzet voor het evacueren van de bevolking. Op basis van gegevens over autobezit en aantallen personen aanwezig in voormelde faciliteiten, kan vrij direct bepaald worden hoeveel personen er *niet* met de auto zullen evacueren. Merk op dat de overheid bij het opstellen van de evacuatieplannen dezelfde oefening moet maken om het vereiste aantal in te zetten bussen te bepalen (zie ook paragraaf 3.3.4). Voor zover we weten, wordt in de literatuur nergens verder ingegaan op de modellering van de vervoerwijzekeuze.

5.4.5 Routekeuze

Het laatste submodel beschrijft welke routes worden gevolgd tussen herkomst en bestemming en leidt zo tot de toedeling van het verkeer over de verschillende links in het netwerk.

Een individu of huishouden laat zijn routekeuze afhangen van de (door hem zo gepercipieerde) afstand en reistijd tussen herkomst en bestemming, de veiligheid langs de route en de nabijheid van het gevaar, de verkregen informatie en de kennis van de route (Barrett *et al.*, 2000, p. 9). Elk individu zal op basis van deze factoren zijn keuze optimaliseren: we spreken over het *gebruikersoptimum*. Wanneer elk individu zijn persoonlijk optimum nastreeft, kan het zijn dat de globale verkeersafwikkeling verre van optimaal is. Het *systeemoptimum* is daarentegen gebaseerd op het minimaliseren van de totale reistijd of het maximaliseren van het verkeer op de geplande evacuateroutes en/of op de routes waar de minste blootstelling aan het gevaar optreedt.

Belangrijk bij de verschillende toedelingsmodellen is het onderscheid tussen dynamische en statische toedelingsmodellen. Bij *dynamische toedeling* (*Dynamic Traffic Assignment*, DTA) deelt men het verkeer toe in zeer korte tijdsintervallen en volgt men voertuigen in ruimte

en tijd. Een DTA resulteert in een tijdsafhankelijke beschrijving van de verkeerstoestand op elke link. Dit in tegenstelling tot een *statische toedeling*, waar de verkeerstoestand constant (statisch) wordt aangenomen gedurende een veel groter tijdvenster (ordergrootte verscheidene uren). Daardoor krijgt men geen enkel inzicht in hoe de snelheid, intensiteit, reistijd, enz. variëren in functie van de tijd. Het is duidelijk dat voor evacuaties met hun uitgesproken dynamisch karakter een dynamische toedeling de voorkeur geniet (Sattayhatewa & Ran (2000, p. 6); Alsnih & Stopher (2004, p. 9); Fu & Wilmot (2004, p. 1)). Daarom ook dat uitgebreid aandacht wordt geschonken aan het dynamisch karakter van de verkeersvraag (zie paragraaf 5.4.2).

Hobeika & Kim (1998) onderzochten en vergeleken twee toedelingsmodellen in het kader van een upgrade van MASSVAC 3.0 naar MASSVAC 4.0, een macroscopisch evacuatiemodel dat verder wordt besproken in paragraaf B.4. Die upgrade houdt in dat van de oorspronkelijke toedeling met het algoritme van Dial wordt overgestapt naar een toedeling volgens een *user equilibrium* algoritme.

De methode van Dial houdt zowel rekening met het effect van het verkeersvolume op de reistijden als met een stochastische keuzefunctie voor de routeselectie. Het algoritme van Dial kent wel enkele tekortkomingen (Hobeika & Kim, 1998, p. 193), vooral wanneer routes elkaar overlappen. Daarom werd dus overgestapt naar een gebruikersoptimale evenwichtstoedeling, waarbij voor elk HB-paar de reistijden over de gebruikte routes gelijk zijn aan mekaar én kleiner zijn dan deze over de niet-gebruikte routes.

Er kan voor het modelleren van de routekeuze ook beroep gedaan worden op de algoritmes uit de voor de verkeersmodellering gebruikte software. Zo gebruiken Cova & Johnson (2002) en Church & Sexton (2002) het microscopisch model Paramics. Er wordt wel aangegeven dat het belangrijk is de gehanteerde routekeuzemodellering te begrijpen en kritisch na te gaan of deze wel realistisch is voor evacuaties.

5.5 Bestaande evacuatiemodellen en -pakketten

Sinds het begin van de jaren '80 nam de aandacht voor het modelleren van evacuaties sterk toe. Er werden modellen gebouwd voor de evacuatie van grote gebieden en voor de evacuatie van gebouwen afzonderlijk. Een beknopt overzicht van deze laatste categorie wordt gegeven in Church & Sexton (2002, p. 4). In bijlage B wordt een overzicht van bestaande modellen voor evacuaties van grote gebieden.

Begin jaren '80 ging de aandacht vooral uit naar evacuaties rond nucleaire centrales, mede ten gevolge van het ongeval met de kerncentrale Three Mile Island (Pennsylvania) in maart 1979. Vanaf de jaren '90 kwamen de evacuaties bij orkanen meer en meer op de voorgrond. Eerst bespreken we NETSIM (paragraaf B.1), een microscopisch verkeersmodel uit het begin

van de jaren '80, dat niet echt een evacuatiemodel is. We vervolgen daarna het overzicht met drie macroscopische modellen uit de jaren '80: NETVAC, DYNEV en MASSVAC (paragrafen B.2 t.e.m. B.4. Meer recente modellen zijn OREMS en ETIS (paragrafen B.5 en B.6). Het overzicht wordt afgesloten met twee modellen uit Nederland (paragrafen B.7 en B.8).

5.6 Besluit

In dit hoofdstuk over het modelleren van het verkeer bij evacuaties werd eerst aangegeven wat daar nu juist het belang en het nut van is. Het blijkt dat een evacuatiemodel erg nuttig kan zijn bij het uitwerken van evacuatieplannen. Meer en meer worden evacuatiemodellen dan ook ingeschakeld in beslissingsondersteunende systemen.

Bij het op poten zetten van dergelijke modellen komt heel wat kijken. Daarom werd in een volgende paragraaf het algemeen kader geschetst. Globaal gezien kan men drie stappen onderscheiden: de preprocessing, het eigenlijke evacuatiemodel en de postprocessing.

Het modelleren van verkeer is echter niet nieuw: het wordt ook als analyse- en planningstool gebruikt voor heel wat andere toepassingen. Waar nu juist specifiek aandacht aan moet besteed worden bij het modelleren van het verkeer bij evacuaties in vergelijking met 'normale' situaties, werd op een rijtje gezet in de derde paragraaf. Op het eerste zicht is er niet veel verschil: in beide gevallen is het verkeerspatroon het resultaat van een aantal keuzes die elk individu maakt. Een evacuatiemodel bestaat dan ook, net zoals een traditioneel verkeersmodel, zelf uit een aantal submodellen die elk één keuze modelleren. Deze verschillende submodellen zijn: ritgeneratie, vertrektijdstip, bestemmingskeuze, vervoerwijzekeuze en routekeuze.

Wel verschillend zijn de factoren die de keuzes van een individu bepalen. Zo is bv. het doel van een verplaatsing op een doordeweekse werkdag van heel andere aard dan het doel van een verplaatsing ter evacuatie. Er werd een uitgebreid overzicht gegeven van welke mogelijke uitwerkingen aan al deze submodellen kunnen worden gegeven. Er bestaan zowel vrij eenvoudige als gesofisticeerde submodellen. Men moet in het achterhoofd houden dat dit steeds benaderingen zijn en dat men niet a priori kan zeggen welke benadering 'de beste' is.

In de literatuur worden een aantal bestaande evacuatiemodellen en -pakketten besproken. Tot slot van dit hoofdstuk werd hiervan een overzicht gegeven. Ook hier blijkt er een grote variëteit aan mogelijke uitwerkingen te bestaan.

Hoofdstuk 6

Case study: optimalisatie van contraflow

In dit hoofdstuk wordt een eigen, concrete uitwerking voorgesteld van een evacuatiemodel, dat daarna toegepast wordt in een case study. De case betreft het optimaliseren van contraflow, één van de robuustheidsverhogende maatregelen uit hoofdstuk 3. In de inleidende paragraaf wordt precies aangegeven wat met ‘optimalisatie van contraflow’ bedoeld wordt en wat juist het doel is van deze case study. Vervolgens wordt beschreven hoe de verschillende stappen uit het algemene kader van evacuatiemodellering, zoals voorgesteld in hoofdstuk 5, concreet worden ingevuld. Een belangrijke plaats in het evacuatiemodel is weggelegd voor het ingeschakelde verkeersstroommodel, het *Link Transmission Model* (LTM). Na bespreking van de resultaten van het LTM, worden in een volgende paragraaf deze resultaten verwerkt. Het hoofdstuk wordt afgesloten met het formuleren van een opmerking.

6.1 Inleiding

Stel dat men ervoor kiest om contraflow (zie paragraaf 3.3.1) toe te passen bij een evacuatie. Eenmaal deze beslissing genomen stelt zich een volgende vraag. Op welke links wordt contraflow toegepast en op welke niet? Het is immers onmogelijk alle inwaartse links van het netwerk om te draaien om de evacuatie zo snel mogelijk te laten verlopen. Ten eerste is dit in de praktijk onuitvoerbaar, omdat dit de inzet van enorm veel personeel en materieel zou vergen. Verder moet het gebied nog toegankelijk blijven voor hulpdiensten. Daarenboven zullen er mensen zijn die eerst naar hun woning toe rijden en dan pas met het hele huishouden samen het gebied verlaten (zie paragraaf 5.4.1).

Daarom is het gewenst te bepalen welke combinatie van om te draaien links de optimale is, d.w.z. welke combinatie de grootste reductie geeft in evacuatietijd. Daarbij dient echter ook de kost voor het uitvoeren van deze combinatie in rekening gebracht te worden. Hoe deze gegeneraliseerde ‘opbrengst’ (winst in evacuatietijd versus kostprijs) wordt gedefinieerd,

wordt verder besproken in paragraaf 6.4.

In dit hoofdstuk worden een aantal alternatieve contraflowplannen voor een specifiek scenario opgesteld en onderling vergeleken na simulatie van de verkeersafwikkeling met een evacuatie-model.

Bij dit alles zullen op een aantal plaatsen zo eenvoudig mogelijke aannames gemaakt worden. Het betreft hier namelijk een eerste verkennend onderzoek, waarbij een aantal zaken uit de vorige hoofdstukken *principieel* zullen getest en/of toegepast worden. Het is niet de bedoeling om kant-en-klare, volledig geoptimaliseerde evacuatieplannen af te leveren. In een eventueel vervolgonderzoek kan elke hier geformuleerde aanname nauwkeurig onderzocht en, indien nodig, verbeterd worden. Op basis daarvan én van de hier gehanteerde principes is het dan wel mogelijk praktische besluiten te trekken voor concrete situaties.

Als startpunt voor dat vervolgonderzoek kan hoofdstuk 5 en meer bepaald paragraaf 5.4 gebruikt worden. Daar werden voor de verschillende submodellen (ritgeneratie, vertrektijdstip, bestemmingskeuze, vervoerwijzekeuze, routekeuze) de verschillende mogelijke uitwerkingen aangegeven. In wat volgt wordt telkens gekozen voor een eenvoudige uitwerking. In het vervolgonderzoek zal telkens moeten bepaald worden wat de meest geschikte methode is en deze dan volledig op punt stellen.

Er wordt wel nadrukkelijk op gewezen dat de modellering van de verkeersstromen helemaal niet op een ruw benaderende manier is gebeurd. Als verkeersstroommodel werd namelijk het LTM gebruikt, waarop dieper wordt ingegaan in paragraaf 6.2.2.

6.2 Uitwerking algemeen kader

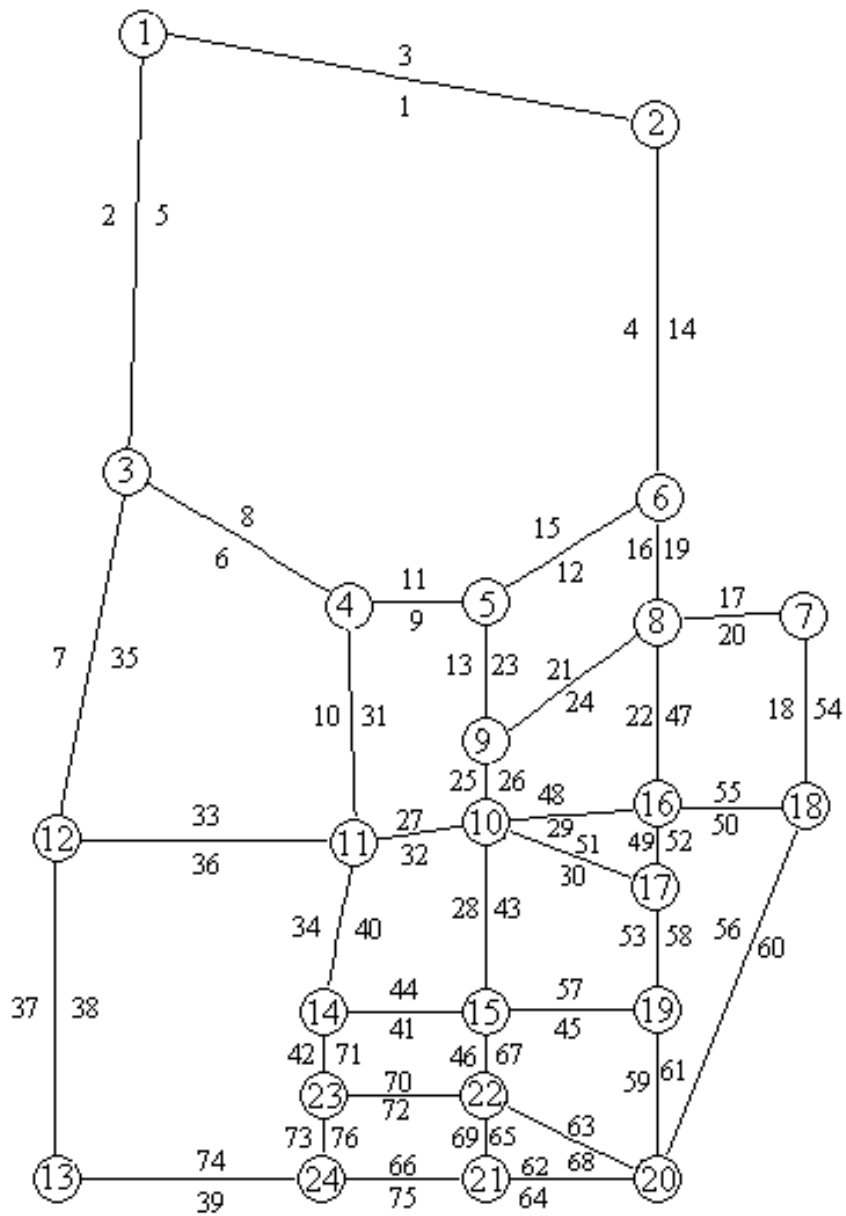
Wat in dit hoofdstuk eigenlijk gedaan wordt, is het concreet invullen van de verschillende deelstappen van het algemeen kader van het modelleren van evacuaties, dat getoond werd in figuur 5.1 (p. 64). In deze paragraaf wordt aangegeven welke nu juist de invulling van de verschillende stappen is.

6.2.1 Preprocessing

Netwerk

Alle simulaties zullen gebeuren op het geschematiseerde netwerk van Sioux Falls, hetgeen getoond wordt in figuur 6.1. Meer gedetailleerde informatie (knoopcoördinaten, capaciteiten, ...) over het netwerk is terug te vinden in bijlage C.

Sioux Falls is een stad in de Verenigde Staten, meer bepaald in de staat South Dakota. Het geschematiseerde netwerk met 24 knopen en 76 links is alom gekend in de verkeerskundige literatuur, waar het frequent dienst doet als testnetwerk bij de ontwikkeling van een nieuw verkeersmodel. Dit is dan ook de reden waarom het in deze context wordt gebruikt.



Figuur 6.1: Het geschematiseerde netwerk van Sioux Falls

Tabel 6.1: Alternatieve contraflowplannen

alternatief	omgedraaide links	alternatief	omgedraaide links
0	/	9	2-7-36
1	1	10	2-7-36-32
2	1-4	11	2-7-36-32-28
3	1-4-16	12	2-7-36-34
3bis	1-16	13	2-7-37
4	1-4-16-22	14	1-2
5	1-4-16-20	15	1-2-7
6	2	16	1-2-16
7	2-6	17	1-2-7-16
8	2-7		

Het netwerk wordt echter telkens gewijzigd door het omdraaien van de rijrichting op die links waar volgens het bestudeerde alternatief contraflow wordt toegepast. De verschillende alternatieve contraflowplannen werden volgens een bepaalde logica, rekening houdend met de routekeuze (zie verder), opgesteld. Het is immers onmogelijk alle mogelijke combinaties te onderzoeken: het netwerk van Sioux Falls biedt met zijn 76 links reeds 2^{76} mogelijke combinaties! Heel wat van deze combinaties zullen echter irrelevant zijn (bv. beide rijrichtingen tussen twee knopen omdraaien) of zelfs onmogelijk (bv. een combinatie waarbij in een knoop alleen maar verkeer aankomt en in die knoop geen link voor uitgaand verkeer meer vertrekt). Daarom werd slechts een beperkt aantal alternatieven geselecteerd. Deze selectie gebeurde zodanig dat men redelijkerwijs kan stellen dat de overige mogelijke combinaties geen verdere verbetering kunnen opleveren. Hoe dit juist gebeurde, staat beschreven in bijlage E.1, waar de alternatieven ook grafisch worden weergegeven in figuren E.1 en E.2. Hier worden de verschillende alternatieven enkel weergegeven in tabelvorm, meer bepaald in tabel 6.1.

Er wordt tenslotte aangenomen dat het omdraaien van een bepaalde link een verdubbeling van de capaciteit van de aanliggende link (in de andere rijrichting) betekent, hetgeen waarschijnlijk een overschatting van de realiteit is (zie p. 35).

Gebiedsgegevens

Op basis van Schmitt (2002) kan besloten worden dat in Sioux Falls momenteel ongeveer 140 000 personen wonen, verdeeld over 60 000 huishoudens. Elk huishouden bestaat gemiddeld dus uit 2,33 personen. In wat volgt zal het huishouden als evacuatie-eenheid beschouwd worden.

Wat betreft de spreiding van deze bevolking over de stad, zijn minder gegevens beschikbaar. Er kan echter aangenomen worden dat aan elke knoop hetzelfde aantal huishoudens kunnen

toegekend worden. Op basis van het stratenpatroon in Sioux Falls (zie figuur C.1 in bijlage C) kan men namelijk afleiden dat de knopen van het geschematiseerde netwerk in dichter bevolkt gebied ook dichter bij elkaar liggen. Zodoende wordt aan elk van de 24 knopen $60\,000/24 = 2\,500$ huishoudens toegekend.

Er wordt nogmaals op gewezen op dat het in deze context geen absolute noodzaak is deze spreiding van de bevolking zo exact mogelijk te bepalen. In de literatuur wordt op dit punt meestal zelfs niet eens met benaderende waarden gerekend: van het netwerk van Sioux Falls wordt enkel de structuur gebruikt. Hier wordt toch enigszins getracht een waarheidsgetrouwe gebiedsbeschrijving te gebruiken.

Scenario

Het scenario dat hier beschouwd wordt, is een preventieve evacuatie, zoals bv. bij het naderen van een orkaan of bij een nakende overstroming. De hele stad moet geëvacueerd worden en iedereen moet het gebied verlaten in noordwestelijke richting. Voor de eenvoud wordt aangenomen dat iedereen zich in de eigen woning bevindt op het moment van de oproep en er dus enkel evacuerend verkeer zich op het verkeersnetwerk zal bevinden.

6.2.2 Evacuatiemodel

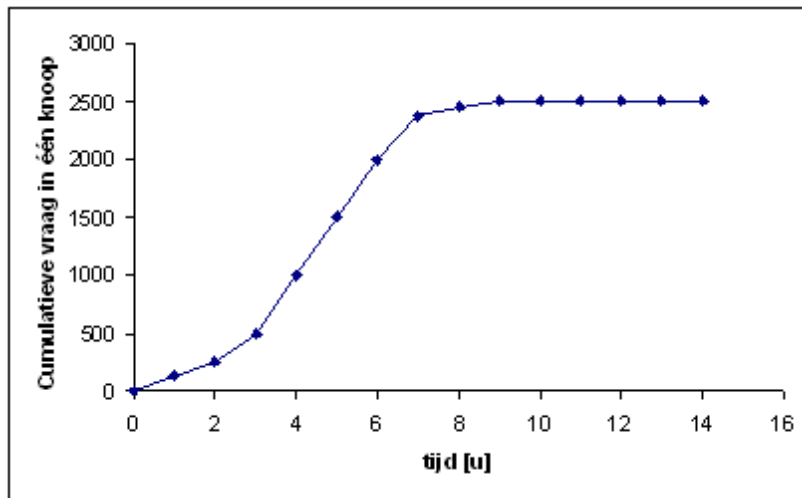
Het eerste gedeelte van het evacuatiemodel bestaat uit de verschillende keuzemodellen ter bepaling van de ritgeneratie, het vertrektijdstip, de bestemmingskeuze, de vervoerwijzekeuze en de routekeuze.

Het tweede gedeelte van het evacuatiemodel modelleert vervolgens de afwikkeling van de verschillende verkeersstromen over het netwerk. De verschillende keuzemodellen geven een antwoord op de vraag hoeveel voertuigen waar en wanneer vertrekken, welke bestemming die voertuigen hebben en welke route gebruikt wordt om die bestemming te bereiken. Dit alles vertaalt zich in verkeersstromen op het netwerk. Om daaruit de evacuatietijden te kunnen bepalen, dient een verkeersstroommodel ingezet. Dat verkeersstroommodel brengt de interacties (congestie, afwikkeling op kruispunten, ...) tussen de verschillende verkeersstromen in rekening en voorspelt op basis daarvan de afwikkeling van het evacuerend verkeer op het netwerk.

Ritgeneratie

Zoals reeds aangegeven in paragraaf 6.2.1 zijn aan elke knoop van het netwerk 2 500 huishoudens (van gemiddeld 2,33 personen) toegekend. Er wordt aangenomen dat iedereen daadwerkelijk evacueert en dat elk huishouden voor de evacuatie één voertuig gebruikt, zodat de totale vraag per knoop 2 500 voertuigen bedraagt, in totaal dus 60 000 voertuigen.

Bovenop deze vraag wordt evacuerend verkeer afkomstig uit het gebied ten zuiden en ten oosten van Sioux Falls beschouwd. Deze wordt ingevoerd als een extra vraag per tijdseenheid



Figuur 6.2: Tijdsprofiel van de vraag in een knoop

van 3000 vtg/u in de knopen 2 en 13.

Vertrektijdstip

Voor het tijdsprofiel van de vraag wordt gebruik gemaakt van één van de S-curves, die reeds besproken werden in paragraaf 5.4.2 en getoond werden in figuur 5.3. Van die drie S-curves wordt hier deze geselecteerd die een snelle evacuatie beschrijft. In figuur 6.2 wordt het tijdsprofiel van de vraag in één knoop weergegeven.

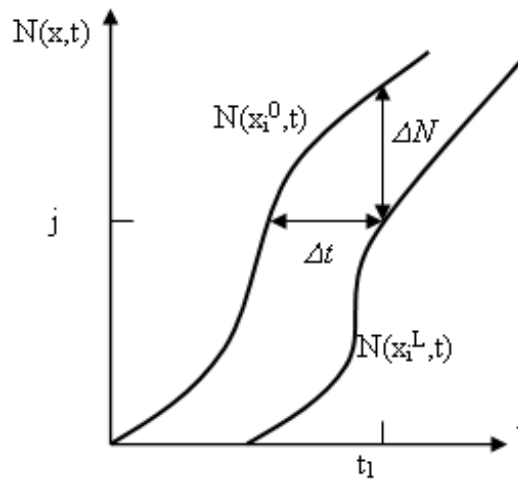
Deze curve verschilt enigszins van deze uit figuur 5.3. In die laatste figuur vindt de evacuatieoproep plaats op tijdstip $t=0$ u, terwijl op dat moment reeds 10% van de totale vraag vertrokken is. In de curve van figuur 6.2 vindt de evacuatieoproep plaats op $t=2$ u en worden de 250 voertuigen (10% van 2500) gelijk verdeeld over de twee eerste uren.

In wat volgt zal het tijdstip van de evacuatieoproep niet meer expliciet beschouwd worden en zal de totale evacuatie-tijd dus bepaald worden t.o.v. het tijdstip $t=0$ u.

Het tijdsprofiel van de vraag zoals getoond in figuur 6.2 geldt voor alle knopen van het netwerk, behalve de knopen 2 en 13, waar bovenop die vraag elk uur 3000 vtg/u respectievelijk links 3 en 38 oprijden. Deze constante vraag geldt tot tijdstip $t=9$ u, zoals te zien op figuur 6.2 het moment waarop iedereen in Sioux Falls vertrokken is. Daarna wordt deze vraag herleid tot 0 vtg/u.

Bestemmingskeuze

Daar de evacuatie in noordwestelijke richting dient te gebeuren, wordt slechts één knoop als bestemming beschouwd, nl. knoop 1. Bijgevolg is er geen bestemmingskeuzemodel nodig:



Figuur 6.4: Principe cumulatieve functies

besproken. Hier wordt kort de algemene oplossingsmethode van het LTM beschreven, gebaseerd op Yperman *et al.* (2005). Verder geven we in deze paragraaf aan waarom het LTM geschikt is om in te schakelen in het evacuatiemodel.

Het LTM bepaalt de dynamische reistijden over de verschillende links van een verkeersnetwerk bij een gegeven tijdsafhankelijke vraag. Het netwerk bestaat uit een aantal homogene links i , met beginpunt x_i^0 (opwaarts) en eindpunt x_i^L (afwaarts). Deze links, met een lengte L_i , zijn onderling verbonden via knopen.

De evolutie van het verkeer op het netwerk wordt voorgesteld met behulp van cumulatieve functies $N(x, t)$. Deze geven het verloop in de tijd weer van het cumulatief aantal voertuigen N dat op een bepaalde plaats x (meer bepaald x_i^0 en x_i^L van alle links i) is voorbijgereden. Deze voorstelling onder de vorm van cumulatieve functies laat toe om eenvoudig de reistijden en dichtheden af te leiden. Dit wordt aangetoond in figuur 6.4. De verticale afstand ΔN tussen de curves $N(x_i^0, t)$ en $N(x_i^L, t)$ op het tijdstip t_1 stelt het aantal voertuigen voor op link i op dat ogenblik. De reistijd van voertuig j over link i is gelijk aan de horizontale afstand Δt tussen de twee curves op ter hoogte van j , indien voertuigen elkaar niet voorbijsteken. De numerieke procedure verdeelt de simulatieperiode in een aantal tijdsintervallen. Voor elk tijdsinterval worden twee stappen uitgevoerd:

- Voor elke **link** wordt enerzijds de *sending flow* aan het afwaarts einde en anderzijds de *receiving flow* aan het opwaartse einde bepaald. De sending flow is het maximum aantal voertuigen dat naar een volgende link kan gestuurd worden in het geval dat die volgende link een oneindige capaciteit zou hebben. De receiving flow daarentegen is het maximum aantal voertuigen dat kan verwerkt worden door de link in het geval van een oneindige vraag.

- De **knoop**modellen bepalen welke gedeelten van deze sending en receiving flows werkelijk kunnen gezonden/verwerkt worden. Deze knoopmodellen transfereren eigenlijk de voertuigen van opwaartse (sending) naar afwaartse (receiving) links en actualiseren tegelijkertijd de waarde van de cumulatieve functies aan de uiteinden van de links verbonden met desbetreffende knoop.

Hoe dit precies uitgewerkt wordt, staat beschreven in bijlage D.

Waarom werd nu juist het LTM ingeschakeld als verkeersstroommodel?

- Filevorming en het aangroeien van wachtrijen worden nauwkeurig beschreven t.g.v. de oplossingsmethode met de sending en receiving flows. Het model kan dus perfect aangewend worden voor het bestuderen van een extreem grote verkeersvraag.
- De output van het LTM bestaat uit cumulatieve functies ter hoogte van de uiteinden van alle links. Zoals verder in paragraaf 6.3 zal blijken, kunnen uit deze informatie gemakkelijk wachttijden, vertragingen, evacuatie tijden, enz. bepaald worden. Men beschikt dus over gedisaggregeerde output om de verschillende evacuatieplannen te classificeren. Ook is het mogelijk om eventuele bottlenecks te localiseren.
- In vergelijking met een ander numeriek verkeersstroommodel, het *Cell Transmission Model*, is het LTM nauwkeuriger en vergt het minder rekentijd (Yperman *et al.*, 2005).

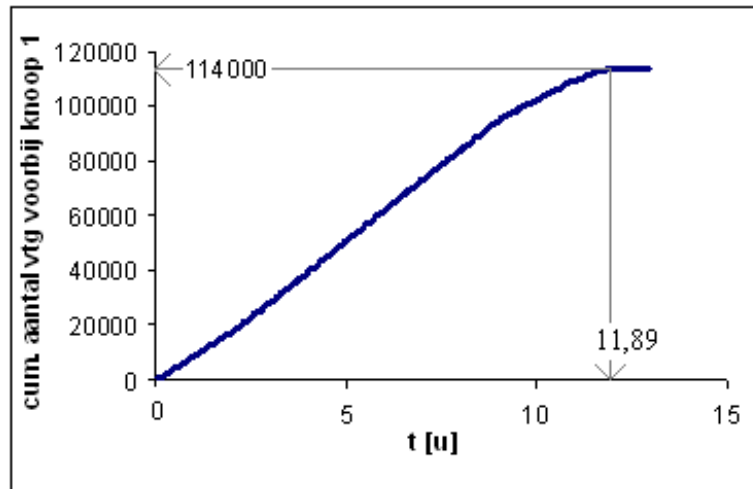
6.2.3 Postprocessing

Voor de verschillende alternatieve evacuatieplannen kan op deze wijze de totale evacuatie tijd bepaald worden. Dankzij het inzetten van het LTM kan men daarenboven beschikken over alle individuele reistijden, waardoor zowel geaggregeerde als gedisaggregeerde gegevens kunnen ingezet worden ter beoordeling en classificatie van de voorgestelde alternatieve evacuatieplannen. Dit is inderdaad gewenst, zoals reeds werd aangegeven in paragraaf 5.2.

De classificatie van de alternatieven zal gebeuren aan de hand van een eenvoudige kostenfunctie met een beperkt aantal variabelen. Ook hier geldt bijgevolg de opmerking dat in een eventueel vervolgonderzoek deze kostenfuncties op punt kunnen gezet worden, bijvoorbeeld in overleg met specialisten van de politie e.d. Welke beoordelingsparameters in beschouwing worden genomen en hoe de kostenfunctie wordt opgesteld, wordt besproken in paragraaf 6.4. Eerst worden de resultaten van het evacuatiemodel aangegeven.

6.3 Resultaten LTM

Ter illustratie van welke informatie allemaal uit de output van het LTM kan gehaald worden, wordt deze voor de referentiesituatie (nergens contraflow) uitgebreid besproken. Vervolgens wordt de output voor de andere alternatieven behandeld.



Figuur 6.5: Cumulatieve functie voorbij knoop 1

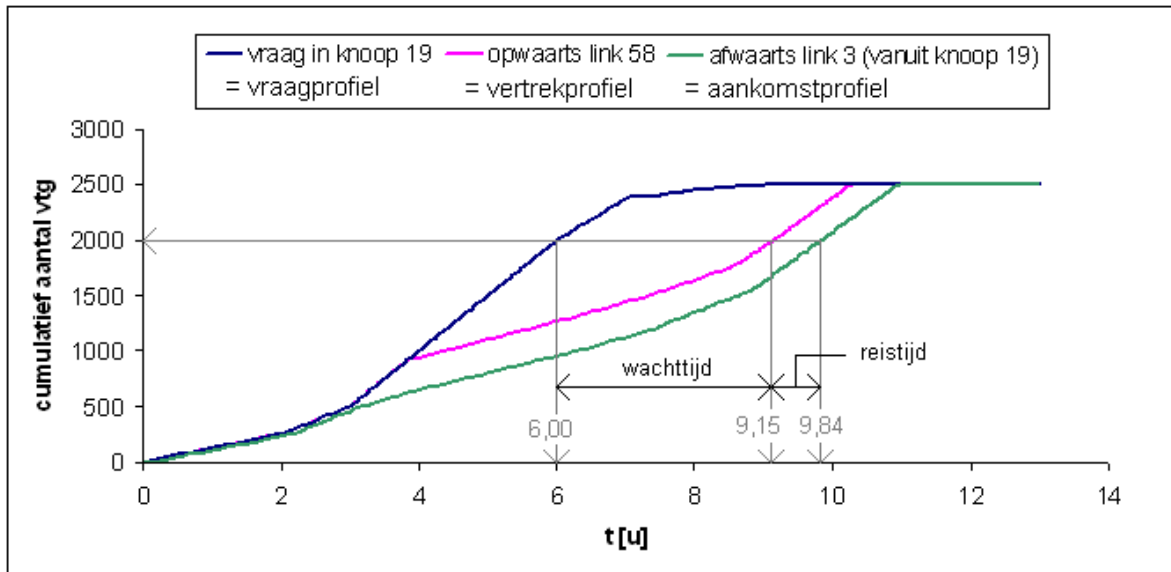
6.3.1 Alternatief 0: geen contraflow

Een eerste belangrijke zaak die kan afgeleid worden, is de totale evacuatielijd, d.i. het tijdstip waarop alle voertuigen het gebied hebben verlaten. Deze kan bepaald worden door de totale, d.w.z. voor alle routes samen, cumulatieve functie ter hoogte van knoop 1 (de bestemmingsknoop) op te stellen. In figuur 6.5 wordt deze cumulatieve functie getoond. De totale evacuatielijd kan afgelezen worden als het tijdstip waarop het cumulatief aantal voertuigen gelijk is aan de totale vraag van $24 \cdot 2500 + 2 \cdot 9 \cdot 3000 = 114000$ voertuigen. Er blijkt dat deze totale evacuatielijd 11,89 u bedraagt.

Naast deze geaggregeerde parameter, biedt het LTM ook de mogelijkheid gedisaggregeerde parameters in rekening te brengen. Het is immers mogelijk de individuele reistijden van elk voertuig te bepalen uitgaande van de verschillende cumulatieve functies. Op basis van een aantal goed gekozen cumulatieve functies kan men zelfs zonder enig probleem het verloop van de evacuatie aflezen. Dit wordt hier geïllustreerd met een paar voorbeelden.

Beschouw figuur 6.6, waar drie verschillende cumulatieve functies worden getoond. De eerste is de cumulatieve curve van *origin node* 19 en is dus het vraagprofiel in deze knoop (zoals getoond in figuur 6.2). De tweede cumulatieve curve is deze opwaarts van link 58, d.i. net afwaarts van knoop 19. Deze curve beschrijft de uitstroom uit knoop 19, dewelke t.g.v. congestie niet noodzakelijk gelijk is aan de vraag in die knoop. Deze curve wordt verder het vertrekprofiel genoemd. De derde en laatste cumulatieve functie van voertuigen uit knoop 19 is deze helemaal afwaarts in het netwerk, aan *destination node* 1. Deze curve beschrijft m.a.w. het aankomstprofiel van de voertuigen uit knoop 19.

Uit deze drie curves kan heel wat informatie gehaald worden. Zo kan bv. de evacuatielijd voor het 2000e voertuig uit knoop 19 bepaald worden, zoals ook aangegeven in dezelfde

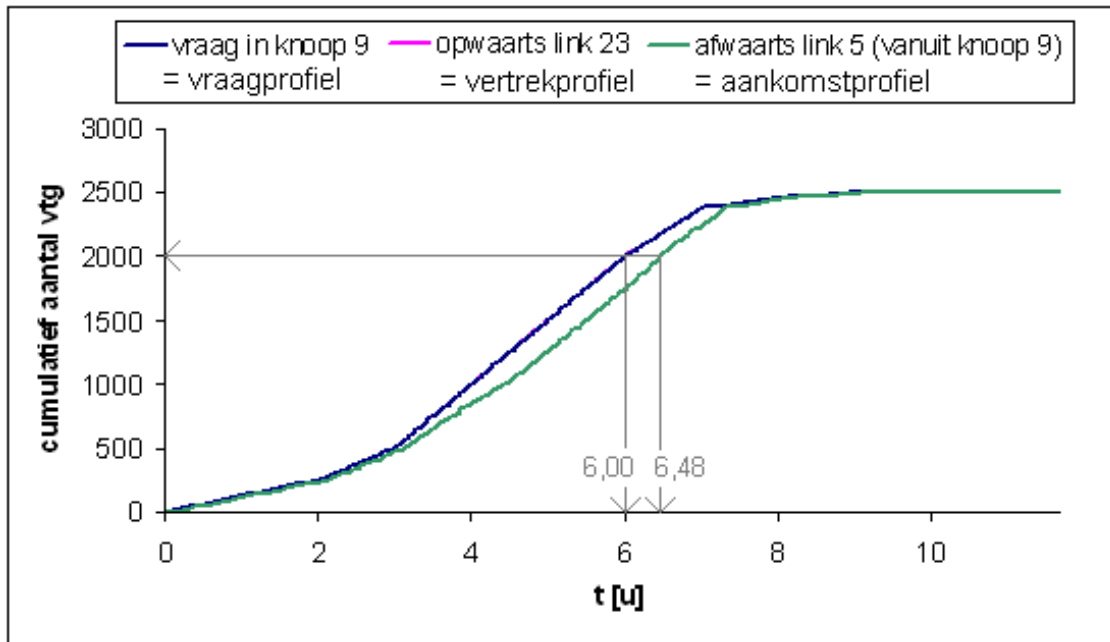


Figuur 6.6: Bepaling evacuatie tijd knoop 19

figuur 6.6. Op een horizontale lijn (cumulatief aantal voertuigen = 2000) kan gemakkelijk afgelezen worden dat desbetreffend voertuig wenst te vertrekken op $t = 6,00$ u (snijding met het vraagprofiel), vervolgens daadwerkelijk het netwerk kan oprijden en vertrekken op $t = 9,15$ u (snijding met het vertrekprofiel) en tenslotte het gebied heeft verlaten op $t = 9,84$ u (snijding met het aankomstprofiel). De evacuatie tijd van het 2000e voertuig bedraagt dus $3,84$ u en bestaat uit een wachttijd van $3,15$ u en een reistijd van $0,69$ u. Deze reistijd is ongeveer het viervoudige van de reistijd in free flow.

Hetzelfde kan herhaald worden voor elk ander voertuig. Het is bijgevolg duidelijk dat ook het verloop van de evacuatie kwalitatief kan afgeleid worden uit deze drie curves. Zo kan men vaststellen dat er gedurende ongeveer de eerste vier uren geen wachttijd is voor de voertuigen uit knoop 19, aangezien het vraagprofiel en het vertrekprofiel samenvallen. Vanaf dat ogenblik reikt de congestie tot aan knoop 19 en neemt de wachttijd vrij snel toe. Er blijkt dus dat de verkeersafwikkeling zodanig problematisch is dat de voertuigen uit knoop 19 letterlijk stilstaan op de hoek van de straat, vooraleer ze het netwerk kunnen oprijden. De reistijd, die tijdens de eerste uren nog gelijk was aan deze in free flow, neemt reeds toe ongeveer vanaf $t = 3$ u: het vertrekprofiel (gelijk aan het vraagprofiel op dat moment) en het aankomstprofiel waaiëren vanaf dat tijdstip uit.

In figuur 6.7 zijn dezelfde curven weergegeven, maar dan voor knoop 9. Het vraagprofiel en het vertrekprofiel vallen echter steeds exact samen, zodat het vertrekprofiel niet zichtbaar is op de figuur. Dit houdt dus in dat de congestie op geen enkel moment reikt tot aan knoop 9 en er m.a.w. geen wachttijd is. De evacuatie tijd van het 2000e voertuig bestaat dus enkel



Figuur 6.7: Bepaling evacuatielijd knoop 9

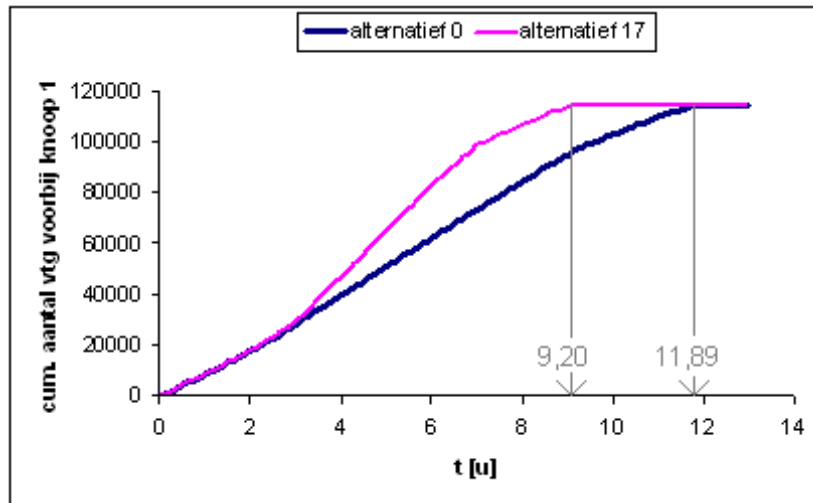
uit een reistijd, die $6,48 - 6,00 = 0,48$ u bedraagt, hetgeen ongeveer het drievoudige is van de reistijd in free flow. Vergelijken van de figuren 6.7 en 6.6 maakt duidelijk dat de voertuigen uit knoop 9 aanzienlijk minder vertraging ondervinden dan deze uit knoop 19.

6.3.2 Alternatieven 1 t.e.m. 17: mogelijke contraflowplannen

Vervolgens werden de verschillende alternatieven uit tabel 6.1 getest. Voor elk van deze alternatieven kan de totale evacuatielijd bepaald worden en vergeleken met deze uit de referentiesituatie. In figuur 6.8 worden de totale cumulatieve curven t.h.v. knoop 1 van alternatief 0 en alternatief 17 vergeleken. Deze figuur maakt het nut duidelijk van het toegepaste contraflowplan 17. De uitstroomintensiteit (d.i. de helling van de cumulatieve curve) is groter, hetgeen resulteert in een aanzienlijk kleinere totale evacuatielijd (9,20 u i.p.v. 11,89 u).

Ook de wacht-, reis- en evacuatielijden van individuele voertuigen bij de verschillende contraflowplannen kunnen bepaald worden, geheel analoog als in de figuren 6.6 en 6.7 voor de referentiesituatie.

Al deze parameters (totale evacuatielijd en individuele wacht- en reistijden) kunnen nu gebruikt worden ter beoordeling van de verschillende alternatieven. Voor de waarden van deze parameters wordt dan ook verwezen naar de volgende paragraaf, waar de postprocessing wordt besproken.



Figuur 6.8: Vergelijking totaal uitstrooprofiel alternatieven 0 en 17

6.4 Postprocessing

In deze paragraaf wordt eerst aangegeven welke parameters worden beschouwd bij de beoordeling van de verschillende evacuatieplannen. Vervolgens worden deze beoordelingsparameters verwerkt in een doelfunctie, aan de hand waarvan de classificatie van de alternatieven dan gebeurt.

6.4.1 Beoordelingsparameters

Hoofddoel van het toepassen van contraflow is uiteraard het versnellen van de evacuatie. In deze optiek is het beste contraflowplan dus datgene dat de grootste reductie geeft in totale evacuatielijd. Vanaf desbetreffend tijdstip is iedereen in veiligheid. De totale evacuatielijd zal bijgevolg de belangrijkste parameter zijn in de doelfunctie.

Dit is echter niet het enige criterium waarop men zich kan baseren ter classificatie van de alternatieven. Het is immers mogelijk dat de totale evacuatielijd groter blijkt dan de beschikbare tijd voor de evacuatie. In dat geval is het aangewezen dat een zo groot mogelijk deel van de bevolking het gebied heeft kunnen verlaten vooraleer bv. de orkaan het gebied bereikt. Daarom wordt ook het gemiddelde van de evacuatielijden van bepaalde knopen afzonderlijk ('individuele evacuatielijden') beschouwd in de doelfunctie.

Een derde parameter is de standaarddeviatie van de individuele evacuatielijden. Het is duidelijk dat, indien twee alternatieven nagenoeg dezelfde totale en gemiddelde evacuatielijd hebben, het alternatief geselecteerd wordt met de kleinste spreiding op de individuele evacuatielijden. Bij een kleine spreiding kan iedereen ongeveer even snel evacueren, terwijl bij een grote spreiding een deel van de bevolking zeer snel kan evacueren, maar een ander deel zeer traag. Deze laatste groep wordt dan in veel grotere mate blootgesteld aan het risico het

gebied niet tijdig te kunnen verlaten.

Ter bepaling van het gemiddelde en de standaarddeviatie werden echter niet de individuele evacuatielijden van alle 24 knopen beschouwd. De knopen waarvan de individuele evacuatielijden (d.i. het tijdstip waarop het laatste voertuig afkomstig uit desbetreffende knoop het gebied heeft verlaten) wordt meegenomen, zijn enerzijds de knopen 9, 19, 20, 21, 23, 24 en anderzijds de knopen 2 en 13. De eerste groep zijn de meest opwaartse knopen van de verschillende routes uit de snelste route-boom (zie figuur 6.3). Het in rekening brengen van enkel deze knopen geeft reeds een volledig beeld van het verloop van de evacuatie in de verschillende deelgebieden van het netwerk, zodat het niet nodig is de andere knopen in rekening te brengen. Omwille van de aanzienlijk grotere vraag (de extra vraag van 3000 vtg/u) in de knopen 2 en 13, de instroompunten in het oosten en het zuiden, en bijgevolg hun relatief groter belang, worden ook deze betrokken.

Van de evacuatielijden van voormelde knopen wordt vervolgens het rekenkundig gemiddelde μ en de standaarddeviatie $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}}$ bepaald.

Tenslotte is ook de kost van een bepaald alternatief een in rekening te brengen parameter. Eenvoudigheidshalve nemen we aan dat deze kosten evenredig zijn met het aantal kilometers weg waar contraflow op werd toegepast. Ook dit is bijgevolg een beoordelingsparameter.

In tabel 6.2 worden voor de verschillende alternatieven de waarden van al deze beoordelingsparameters samengevat. Voor de individuele evacuatielijden van knopen 2, 9, 13, 19, 20, 21, 23 en 24 wordt verwezen naar tabellen E.1 en E.3 in respectievelijk paragrafen E.1.1 en E.1.2, waar deze resultaten ook kort besproken worden.

6.4.2 Classificatie van de alternatieven

Deze case study heeft tot doel het optimaliseren van contraflow in een gegeven netwerk. Er moet echter nog worden vastgelegd wat juist bedoeld wordt met ‘optimaliseren’, m.a.w. op basis waarvan de verschillende alternatieven worden gerangschikt. In de vorige paragraaf werd reeds aangegeven welke parameters allemaal in deze beoordeling worden betrokken. In deze paragraaf wordt een doelfunctie opgesteld, aan de hand waarvan de alternatieven kunnen worden geclassificeerd.

Drie parameters, nl. de totale evacuatielijden, de gemiddelde evacuatielijden en de standaarddeviatie op de individuele evacuatielijden, geven de ‘opbrengst’ van een bepaald alternatief aan, door het verschil maken met de waarde ervan in alternatief 0 (nergens contraflow). Daar deze parameters allen een dimensie van tijd hebben, worden ze vervat in de **gegeneraliseerde tijds winst W** , die gedefinieerd wordt als een gewogen gemiddelde:

Tabel 6.2: Overzicht beoordelingsparameters voor de verschillende alternatieven

alternatief	totale evacuatie- tijd T [u]	aantal km omgedraaid	μ [u]	σ [u]
0	11,89	0,00	10,50	1,01
1	11,89	5,37	10,47	1,03
2	11,89	9,22	10,47	1,03
3	11,89	10,54	10,10	1,12
3bis	11,89	6,69	10,10	1,12
4	11,89	12,52	10,10	1,12
5	11,89	12,08	10,10	1,12
6	11,00	4,62	9,96	0,60
7	11,00	7,19	9,96	0,60
8	11,00	8,55	9,58	0,69
9	11,00	11,63	9,58	0,69
10	11,00	12,97	9,58	0,69
11	11,00	14,95	9,58	0,69
12	11,00	13,42	9,58	0,69
13	11,00	12,07	9,58	0,69
14	10,97	9,99	9,94	0,61
15	10,97	13,92	9,55	0,68
16	10,24	11,31	9,57	0,44
17	9,24	15,24	9,18	0,05

$$W = \frac{\alpha \cdot (T_0 - T) + \beta \cdot (\mu_0 - \mu) + \gamma \cdot (\sigma_0 - \sigma)}{\alpha + \beta + \gamma} \quad (6.1)$$

waarbij:

- α, β, γ : gewichtsfactoren
- T : totale evacuatieuur
- μ : gemiddelde evacuatieuur
- σ : standaarddeviatie van de individuele evacuatie tijden
- T_0, μ_0, σ_0 : waarden van T, μ en σ in alternatief 0.

Tegenover deze opbrengst staat de ‘kost’ van een bepaald plan. Zoals reeds gezegd wordt deze hier evenredig verondersteld met het aantal kilometer aan omgedraaide links.

De te maximaliseren doelfunctie stelt de opbrengsten dan tegenover de kosten:

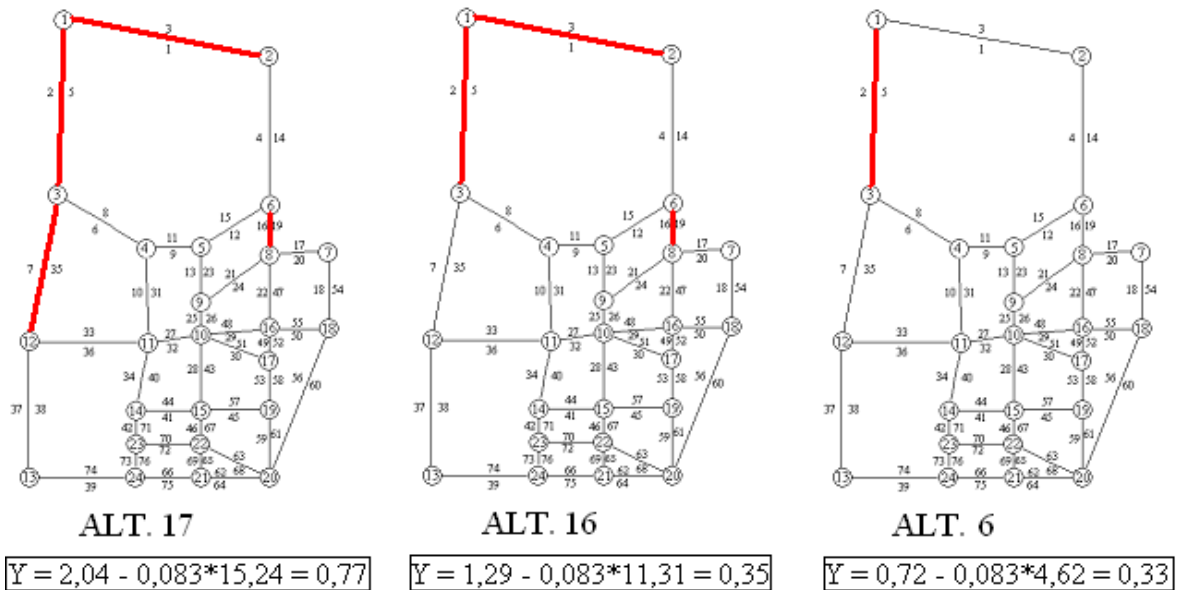
$$Y = W - \delta \cdot K \quad (6.2)$$

waarbij:

- W [u]: gegeneraliseerde tijds winst
- K [km]: aantal kilometer aan omgedraaide links
- δ [u/km]: wegingsfactor

De wegingsfactor δ zorgt ervoor dat de kost van het omdraaien van het aantal kilometer aan omgedraaide links uitgedrukt wordt in een eenheid van tijd. Bijgevolg geeft δ in feite aan welke gegeneraliseerde tijds winst de kost van het omdraaien van één omgedraaide kilometer rechtvaardigt. Wanneer de doelfunctie voor een bepaald alternatief dan een negatieve waarde aanneemt, houdt dit in dat de gegeneraliseerde tijds winst te klein geacht wordt in verhouding tot de kost van het omdraaien van x aantal km links. Een positieve waarde van de doelfunctie daarentegen betekent dat de baten groter zijn dan de kosten. Het alternatief met de grootste waarde van Y kan als het beste alternatief bestempeld worden.

Het is duidelijk dat het toekennen van de juiste waarden voor de verschillende wegingsfactoren α, β, γ en δ van groot belang is. Daarenboven zullen voor elk netwerk en voor elk scenario die factoren andere waarden kunnen aannemen, afhankelijk van de beoordeling van de analist.



Figuur 6.9: Beste 3 alternatieven indien $\alpha = 3$, $\beta = 1$, $\gamma = 1$ en $\delta = 0,0833$ u/km

Hier worden, enigszins arbitrair, voor de gewichtsfactoren volgende waarden aangenomen: $\alpha = 3$, $\beta = 1$, $\gamma = 1$ en $\delta = 0,0833$ u/km. M.a.w. wordt het belang van de totale evacuatielijd 3 maal zo belangrijk beschouwd als dat van de gemiddelde evacuatielijd en van de spreiding in evacuatielijden. Verder wordt met $\delta = 0,0833$ u/km aangegeven dat per km omgedraaide links minstens een gegeneraliseerde tijdsduwinst van 0,0833 u of 5 min wordt verwacht.

Met deze wegingsfactoren werd vervolgens voor alle alternatieven de waarde van de doelfunctie bepaald. Vijf alternatieven leveren een positieve waarde op, meer bepaald de alternatieven 6, 7, 8, 16 en 17. Alternatief 17 vertoont de meest gunstige baten-kostenverhouding met een waarde van \bar{Y} van 0,77 u. In figuur 6.9 worden de drie beste alternatieven weergegeven. Voor de waarde van de doelfunctie van de andere alternatieven wordt verwezen naar tabel E.4 in bijlage E.2.1.

In bijlage E.2.2 wordt de gevoeligheid van de oplossing voor de keuze van α , β , γ en δ onderzocht. Er blijkt dat de alternatieven 17, 16 en 6 voor een aantal onderzochte combinaties van α , β , γ en δ steeds als de beste drie alternatieven uit de bus komen. Daarenboven blijft de volgorde nagenoeg steeds behouden. Voor deze case blijkt de gevoeligheid bijgevolg gering. Wel is het uiteraard zo dat vanaf een bepaalde waarde van δ de kosten hoger worden ingeschat dan de opbrengsten en alternatief 0 (nergens contraflow) dus te verkiezen is. Hieruit onthouden we dat vooral het toekennen van een juiste waarde aan de wegingsfactor δ van groot belang is.

6.5 Opmerking

Op basis van de hier voorgestelde methodologie blijkt alternatief 17 het beste te zijn. Bij dit alles geldt echter de opmerking dat in dit hoofdstuk het gestelde probleem theoretisch benaderd werd en dat een aantal praktische zaken buiten beschouwing werd gelaten, zoals bijvoorbeeld:

- Kunnen de hulpdiensten het gebied nog binnenrijden?
- Kan op de desbetreffende plaats wel een beginpunt van contraflow (zie paragraaf 3.3.1) geïnstalleerd worden?

Er wordt daarenboven op gewezen dat alternatief 17 niet noodzakelijk het best mogelijke evacuatieplan is. Het is immers zeer goed mogelijk dat bv. door het faseren van de vraag of door het opleggen van andere evacuatielroutes de verkeersafwikkeling reeds vlotter verloopt, zodat misschien een kleiner aantal omgedraaide links kan volstaan.

Men kan dit nog anders uitdrukken. Indien enkel wordt gekeken naar contraflow als robuustheidsverhogende maatregel, dan is alternatief 17 het optimum. Maar op basis van het hier besproken onderzoek kan niet worden vastgesteld of dit het globale optimum (met een optimale verdeling van de verkeersstromen) is.

6.6 Besluit

In dit hoofdstuk werd voor een specifiek scenario en voor het specifieke netwerk van Sioux Falls een methodologie ter bepaling van de optimale combinatie van links waarop contraflow wordt toegepast, voorgesteld en uitgewerkt. Dit alles komt neer op een concrete invulling van het in hoofdstuk 5 voorgestelde algemene kader voor het inschakelen van evacuatiemodellen voor het opstellen van evacuatieplannen. Hierbij werd een aantal eenvoudige aannames gedaan. Cruciaal was het inschakelen van het *Link Transmission Model* als verkeersstroommodel. Dat model blijkt inderdaad geschikt te zijn voor het modelleren van verkeersstromen bij een extreem grote vraag.

Na het opstellen van een aantal mogelijke combinaties van contraflow, werden deze alternatieven getest met het LTM. Op basis van de uitvoer van het LTM werden voor de verschillende alternatieven de totale evacuatietijd, de gemiddelde evacuatietijd en de standaarddeviatie op de evacuatietijden van een aantal knopen afzonderlijk bepaald. Deze drie parameters werden vervolgens samengevat in een gegeneraliseerde tijdsinstelling, die als ‘opbrengst’ van een bepaald alternatief kan worden beschouwd. Door afweging van deze opbrengsten tegen de kosten, die evenredig worden verondersteld met het aantal km aan omgedraaide links, kon tenslotte overgegaan worden tot classificatie van de verschillende alternatieven.

Uit deze case study zelf kunnen, omwille van de specificiteit, geen algemene besluiten getrokken worden. Wel werd duidelijk dat het met behulp van het voorgestelde evacuatiemodel inderdaad mogelijk is om evacuatieplannen te optimaliseren.

Hoofdstuk 7

Besluit

In deze thesis wordt ingegaan op het aspect van de verkeersafwikkeling bij rampen en bijhorende grootschalige evacuaties. Er wordt gezocht naar een antwoord op de vraag: “Is het bestaande verkeersnetwerk robuust genoeg of leidt een extreem grote verkeersvraag sowieso tot algehele chaos en stilstand op de wegen?” Of is er daarentegen door goed management al veel op te lossen en welke maatregelen kan men dan best treffen?

In het eerste deel van deze thesis wordt daartoe de state-of-the-practice in België, de Verenigde Staten en Nederland beschreven. Telkens wordt aangegeven waar zich het aspect van het verkeersmanagement bevindt binnen de rampbestrijdingsorganisatie en de rampenplanning en worden bestaande specifieke verkeersregelplannen en maatregelen besproken.

In België is het eerder uitzonderlijk om concrete verkeersregelplannen uit te werken voor eventuele rampen. De besproken voorbeelden, zoals het verkeersregelplan voor de haven van Antwerpen, zijn de uitzonderingen die deze regel bevestigen. In de meeste gevallen rekent men op de terreinkennis van het personeel en steunt men op de praktijk van het zoneren van het rampterrein. In de planvorming is het regelen van het verkeer zeker niet als prioritair te bestempelen. In de gevallen waar toch plannen werden opgesteld, wordt vooral gekeken naar de verkeersafwikkeling en -regeling bij rampen en niet zozeer bij de eventueel ermee gepaard gaande evacuaties: op grootschalige evacuaties is men helemaal niet voorbereid.

Het blijkt dat men in de Verenigde Staten veel belang hecht aan het degelijk plannen van het verkeersluik van hun *hurricane evacuations*, mede als gevolg van de enorme verkeerschaos bij evacuaties eind jaren '90. Men beschikt over een hele set van plannen, maatregelen en hulpmiddelen om de verkeersafwikkeling bij grootschalige evacuaties zo vlot mogelijk te houden. Vooral het verhogen van de capaciteit voor het evacuerende verkeer, *contraflow*, wordt veel toegepast. Het principe, het omwisselen van de rijrichting van een aantal rijstroken, is eenvoudig, maar praktisch en organisatorisch komt er toch heel wat bij kijken. Ook van de hedendaagse technologie, de *Intelligent Transportation Systems*, maakt men gebruik.

Het grote verschil tussen België en de Verenigde Staten is deels te wijten aan het feit dat de kans op een grote (natuur)ramp, leidend tot een grootschalige evacuatie, aanzienlijk groter is in de Verenigde Staten. Ook het recente terrorisme heeft geleid tot het toegenomen belang dat men hecht aan het *emergency management*.

Om een meer ‘eerlijke’ vergelijking te maken, werd ook de huidige praktijk in Nederland besproken. Wat betreft de rampenbeheersing zijn heel wat gelijkenissen te noteren tussen Nederland en België, zoals o.a. de organisatiestructuur bij de rampenbestrijding. Belangrijkste verschil is het ontbreken van regionale hulpverleningsdiensten in België. Daarenboven is er in België geen overeenstemming tussen de verschillende hulpdiensten wat betreft de functionele indeling van het grondgebied in zones.

Op het gebied van verkeersregeling bij rampen en evacuaties zijn grote verschillen op te merken. In tegenstelling tot België, beschikt men in Nederland over gedetailleerd uitgewerkte evacuatieplannen. Daarenboven gaat men in Nederland veel verder in het uitwerken van de verkeersregelplannen binnen de rampbestrijdingsplannen. Daar waar in België in de rampenplannen enkel wordt aangegeven wie verantwoordelijk is voor de verkeersregeling, worden in Nederland de te treffen verkeersmaatregelen gedetailleerd beschreven.

Het tweede gedeelte van deze thesis spitst zich toe op het modelleren van het verkeer bij evacuaties. Verkeersmodellen zijn ideale hulpmiddelen om de robuustheid van een verkeersnetwerk te onderzoeken, om het effect van een nieuwe maatregel te testen of om evacuatieplannen te optimaliseren.

Bij het op poten zetten van dergelijke modellen komt heel wat bij kijken. In het geschetste algemeen kader kunnen drie stappen onderscheiden worden: de preprocessing, het eigenlijke evacuatiemodel en de postprocessing.

Het modelleren van verkeer is echter niet nieuw: het wordt ook als analyse- en planningstool gebruikt voor heel wat andere toepassingen. Op het eerste zicht is er niet veel verschil tussen het modelleren van verkeer bij evacuaties en in ‘normale’ omstandigheden: in beide gevallen is het verkeerspatroon het resultaat van een aantal keuzes die elk individu maakt. Een evacuatiemodel bestaat dan ook, net zoals een traditioneel verkeersmodel, zelf uit een aantal submodellen die elk één keuze modelleren. Deze verschillende submodellen zijn: ritgeneratie, vertrektijdstip, bestemmingskeuze, vervoerwijzekeuze en routekeuze. Wel verschillend zijn de factoren die de keuzes van een individu bepalen. Er werd een uitgebreid overzicht gegeven van welke mogelijke uitwerkingen aan al deze submodellen kunnen worden gegeven in het kader van evacuaties.

Vervolgens werd een eigen, concrete invulling van het geschetste algemene kader en van de verschillende submodellen voorgesteld. Dat model werd daarna toegepast in een case study

“optimalisatie van contraflow”. Voor een specifiek scenario en voor het specifieke netwerk van Sioux Falls werd een methodologie ter bepaling van de optimale combinatie van links waarop contraflow wordt toegepast, voorgesteld en uitgewerkt. Cruciaal was het inschakelen van het *Link Transmission Model* als verkeersstroommodel. Dat model blijkt inderdaad geschikt te zijn voor het modelleren van verkeersstromen bij een extreem grote vraag.

Op heel wat plaatsen bij de opbouw van het evacuatiemodel werden zo eenvoudig mogelijke veronderstellingen gemaakt. In een eventueel vervolgonderzoek kan elke geformuleerde aanname nauwkeurig onderzocht en, indien nodig, verbeterd worden. Op basis daarvan én van de gehanteerde principes is het dan wel mogelijk praktische besluiten te trekken voor concrete situaties. Uit de case study zelf kunnen, omwille van de specificiteit, geen algemene besluiten getrokken worden. Wel werd duidelijk dat het met behulp van het voorgestelde evacuatiemodel inderdaad mogelijk is om evacuatieplannen te optimaliseren.

Als algemeen besluit kan gesteld worden dat België op het gebied van het op voorhand plannen van verkeersmanagement bij rampen en evacuaties sterk achterop hinkt in vergelijking met Nederland en de Verenigde Staten. Naast het feit dat in België de kans op (natuur)rampen die een grootschalige evacuatie vereisen kleiner ingeschat wordt, is een mogelijke verklaring hiervoor het niet recent te zijn opgeschrikt door dergelijke ramp.

Uit de studie van de huidige praktijk in de Verenigde Staten, blijken er toch heel wat maatregelen, zoals bv. contraflow, te bestaan die de robuustheid van het verkeersnetwerk kunnen verhogen. Belangrijk bij dit alles is het ontwikkelen van gedetailleerde en wel doordachte evacuatieplannen. Zoals werd aangetoond met de case study kan het gebruik van een evacuatiemodel een grote hulp betekenen voor het ontwikkelen en optimaliseren van dergelijke plannen.

Bijlage A

Broomincident 4 maart 2004

In deze bijlage wordt, na een korte duiding bij het betrokken product, het relaas gedaan van het broomincident, gebaseerd op het achteraf opgestelde interventieverslag (Stoffels, 2004). Deze ramp is één van de weinige uit het recente verleden in Vlaanderen, waarmee een enigszins grootschalige evacuatie gepaard ging. Heel wat begrippen die in deze beschrijving voorkomen, worden uitgelegd in hoofdstuk 2. Deze bijlage kan dus ook aanzien worden als een praktijkvoorbeeld bij dat hoofdstuk.

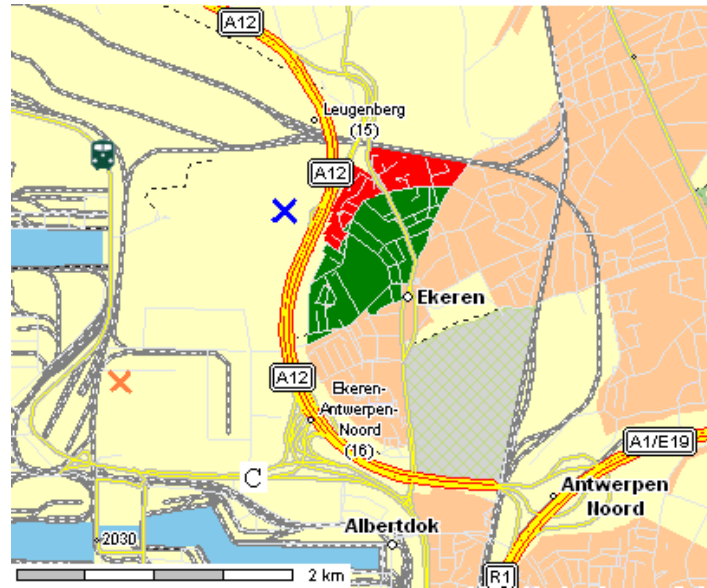
Tenslotte geven we aan welke lessen werden getrokken uit deze ramp en de bestrijding ervan, meer bepaald de ermee gepaard gaande evacuatie.

A.1 Broom

Broom is een zware vloeistof met een hoge dampspanning, zodat vrij vlug zware dampen vrijkomen. Deze dampen zijn uiterst toxisch en corrosief. In combinatie met water vormt zich daarenboven het zeer bijtende broomzuur HBr. Tenslotte kunnen explosieve dampen ontstaan wanneer broom in contact wordt gebracht met metalen en organische stoffen.

Het is dus niet zonder reden dat broom met speciale vrachtwagens getransporteerd wordt. Het gaat in dit geval om een tankcontainer: een cilindrische opslagtank die gepakt zit in een stalen frame. Dit frame moet niet alleen de tank beschermen, het zorgt er ook voor dat het geheel stapelbaar is op en tussen containers in een schip.

De tank zelf bestaat uit een stalen mantel van enkele millimeters met daarbinnen een bekleding van ca. 10 cm lood. Dit soort tankcontainers is dan ook zo goed als onkwetsbaar, zoals verantwoordelijken van alle firma's die met broom werken, de brandweer vóór 4 maart verzekerden. Zo was er bijvoorbeeld enkele maanden voor deze ramp een grote rampoefening met een broomcontainer nabij de Thijsmanstunnel. Hierbij werd gezegd dat het inge oefende scenario (val van een tankcontainer bij behandeling en vrijkomen van het broom in een hoeveelheid van enkele tientallen liters) nagenoeg onmogelijk kan optreden. Nog geen jaar later



Figuur A.1: Situering broomincident

werd men dus geconfronteerd met 6800 liter gelekte broom ...

A.2 Verloop van de ramp en de interventies

Donderdag 4 maart 2004 om 12.29u reed een vrachtwagenchauffeur onvoorzichtig door een vrij scherpe bocht aan de Schouwkenweg (aangeduid met het oranje kruisje in figuur A.1). De vrachtwagen was geladen met een tankcontainer broom. De inhoud bedroeg ca. 6800 liter (22 ton). De vrachtwagen met container kantelde, de tank kwam los van het frame en viel te pletter op de grond. Hierbij kwam de koepel met daaronder de vulopening op de boordstenen terecht, waardoor een groot lek ontstond. Ongeveer de volledige inhoud van de tank kwam op deze manier vrij en vormde een enorme plas. Hierboven ontstond een bruine dampwolk die langzaam richting noorden begon te drijven maar zich door het gebrek aan wind ook tegenwinds verspreidde. De vloeistof liep daarenboven onmiddellijk de riolen in.

Om 12.34u komt de eerste ziekenwagen aan. Deze ambulanciers nemen grote risico's om de licht gekwetste bestuurder uit zijn cabine te halen en redden daarmee zonder twijfel zijn leven. De bestuurder wordt afgevoerd naar het Jan Palfijn-ziekenhuis.

Om 12.40u kondigt de brandweer fase I van het rampenplan (zie paragraaf 2.1.1 p. 16) af, nadat duidelijk werd dat de giftige stof broom betrof. Tevens laat de brandweer een perime-ter (zie paragraaf 2.2.3 p. 21) van 500 m volledig ontruimen. 7 minuten later wordt omwille van de ingeschatte ernst van het incident opgeschaald naar fase II (zie paragraaf 2.1.1 p. 16), waardoor het stedelijk coördinatiecomité (zie paragraaf 2.1.2 p. 17), onder leiding van burge-



Figuur A.2: Afdammen en bedekken van de vloeibare broom nabij de gekantelde vrachtwagen

meester Janssens, wordt bijeengeroepen op het hoofdkantoor van de politie in het centrum van Antwerpen.

Tengevolge van het groot aantal medische klachten van mensen uit de nabije omgeving of van personen die per wagen in de buurt (Noorderlaan) voorbijreden, wordt om 12.50u het Medisch Interventieplan (zie paragraaf 2.2.2 p. 19) afgekondigd. Om 12.59u vraagt de brandweer zandzakjes om de riolen dicht te leggen. Op datzelfde moment wordt op voorstel van de brandweer de Operationele Commandopost (zie paragraaf 2.1.2 p. 17) ingericht op het kruispunt Noorderlaan - Luithagen (aangeduid met de letter C op figuur A.1).

De verantwoordelijke van de medische hulpdiensten, dr. Beaucourt, richt een vooruitgeschoven medische hulppost in om 13.42u. Later zal blijken dat tengevolge van communicatieproblemen massaal veel personen zich begeven naar deze medische post, daarheen gestuurd door het Vlaams Verkeerscentrum.

Het blijkt dat er vooral medische klachten zijn bij mensen die op de Noorderlaan reden. Deze wordt daarom volledig afgesloten. De eerste metingen op grotere afstand (in Ekeren en op de A12) geven aan dat daar geen gevaar bestaat voor de bevolking of het verkeer.

Vanuit het coördinatiecomité wordt de hulp ingeroepen van specialisten van BASF, Bayer en Broomchemie N.V. De politie staat in voor de begeleiding van deze personen en het aangevoerde materieel tot in het rampgebied.

Het vloeibare broom wordt, zoals te zien op figuur A.2 (bron: Provinciaal Instituut voor Brandweer en Ambulanciersopleiding (2005)), ingedamd en bedekt met zeilen om verdamping tegen te gaan. De toch ontsnappende dampen worden bestreden met gasvormig ammoniak.

Het in de riool gelopen broom wordt geneutraliseerd met natronloog (NaOH) en natriumbisulfit (NaHSO₃). Het afsluiten van de riool lukt niet omdat de pneumatische kussens, dewelke daarvoor normaal gebruikt worden, te klein zijn voor deze riool met een diameter van 160 cm. Men besluit daarom om 1 km verder afwaarts een dam te maken door een vrachtwagen zand in de riool te laten storten.

Maar ondanks al deze voorzorgsmaatregelen blijkt er toch broom door te komen aan het uitstroompunt van de riool, aangeduid op figuur A.1 met het blauwe kruisje. Men wordt dus geconfronteerd met een tweede emissiebron. Omstreeks 16.20u wordt dan beslist om op te schalen naar fase III, waardoor de gouverneur het stedelijk crisiscentrum vervoegt en er de leiding van neemt. Er wordt overgegaan tot deze opschaling omdat ten eerste de secundaire emissiebron zich op een honderdtal meter van een woonwijk bevindt, ten tweede de buurgemeente Hoevenen-Stabroek betrokken kan raken en ten derde omdat er nood is aan extra materieel en meetcapaciteit.

Onmiddellijk wordt beslist een zone rond de secundaire bron preventief te evacueren, nl. de op figuur A.1 in het rood aangeduide zone. Het betreft in totaal ongeveer 800 personen. De lokale politie coördineert deze evacuatie. Omdat de dampen mogelijks levensbedreigend zijn, wordt beslist indien nodig manu militari op te treden. Iedereen moet dus het gebied verlaten. Het gaat hier immers niet om een bedreiging van have en goed, zoals bij een overstroming, maar om een rechtstreekse bedreiging van het leven. In zo'n geval worden geen concessies gedaan en worden mensen desnoods manu militari uit hun huizen verwijderd.

Grote verwarring ontstaat wanneer mensen een overdaad aan informatie verkeerd beginnen interpreteren. Verschillende keren is gemeld enerzijds dat de evacuatie werd gestopt, anderzijds dat ook Kapellen en Hoevenen geëvacueerd moesten worden. Vanuit het coördinatiecomité was hiervoor echter geen enkele order gekomen, maar blijkbaar gaan uitspraken van personen op het terrein soms een eigen leven leiden.

Ondertussen was reeds beslist ook de A12 volledig af te sluiten, tussen de afritten Ekeren en Hoevenen-Kapellen.

Rond 17.30u lijkt de situatie zich te stabiliseren, maar omdat nog te veel broomdampen in de riool opgesloten zitten, wordt de A12 nog niet vrijgegeven. De verkeerschaos is enorm (zie paragraaf 1.1).

Om 19.00u escaleert het gevaar opnieuw, doordat de wind is gaan liggen. Plots komen erg veel alarmerende oproepen binnen van zowel bevolking als van patrouillerende politie-eenheden. Metingen bevestigen inderdaad de verhoogde concentraties in de desbetreffende wijken. Men gaat direct over tot de evacuatie van de op figuur A.1 in het groen aangeduide zone. In deze zone ligt o.a. het opvangcentrum waarheen de mensen uit de rode zone werden gebracht, zodat ook dit moet ontruimd worden. Deze evacuatie verloopt in twee fases: eerst het noordelijke deel, daarna het zuidelijke. In totaal zullen dan 3000 mensen geëvacueerd zijn. Voor deze

evacuatie worden 10 bussen van De Lijn opgeëist. Vanuit het centrum van Ekeren worden de mensen naar drie bovenwindse opvangcentra in Merksem gebracht.

Rond hetzelfde tijdstip zijn alle middelen aanwezig om met de neutralisatie van alle broom te kunnen starten, eerst op de plaats van het ongeval zelf, daarna in de buurt van het uitstroompunt.

Omstreeks 22.00u wordt duidelijk dat de wolk niet verder uitbreidt en dat het gevaar geweken is. Sinds 20.20u zijn in de wijk geen metingen boven nul meer verricht. Er wordt om twee redenen beslist de evacuatie toch verder te laten doorgaan. Ten eerste is er de vaststelling dat de mensen ondertussen gesettled zijn en hen nu terug naar huis sturen praktisch niet doenbaar was. Belangrijker nog was de vrees dat er in de ochtend, bij het doorspoelen van de riolering na neutralisatie, opnieuw een gaswolk zou ontsnappen.

Vrijdagochtend (4.30u) herstart men de neutralisatie op de ongevalsite na het wegnemen van de rioolblokkade. De problemen aan het uitstroompunt nabij Ekeren zijn ondertussen onder controle doordat voldoende gasvormig ammoniak beschikbaar is om de broomdampen onmiddellijk te neutraliseren.

Om 4.00u gaat de Noorderlaan terug open, om 6.30u de A12. In de namiddag mag iedereen naar huis en wordt de rampenfase teruggebracht tot fase I.

De volgende dagen gebeurt de nazorg (zie paragraaf 1.4.3 p. 7): opruimen van het afval, takelen van de vrachtwagen, doorspoelen en controleren van de riolen, enz. Maandagochtend wordt rampenfase I afgeblazen.

A.3 Lessons learned

In deze paragraaf geven we aan welke lessen er getrokken werden i.v.m. de evacuatie. Voor de getrokken lessen op het gebied van de interventie, het meetplan, de organisatie en de preventie & preparatie, verwijzen we naar Provinciaal Instituut voor Brandweer en Ambulanciersopleiding (2005).

- Als **vuistregel om de evacuatie te bevelen** werd uitgegaan van drie parameters: het zeer hoge gezondheidsrisico reeds bij zeer lage meetwaarden, de relatief hoge vluchtigheid, de inschatting dat het incident niet binnen redelijke termijn onder controle zou zijn.
- Een groot probleem bij de evacuatie bleek **het hergroeperen en bijhouden van gezinnen** te zijn: door school, werk en andere activiteiten zijn gezinnen niet samen. Bij een gedwongen en snelle evacuatie leidt dit er toe dat kinderen ronddolen, familieleden

hun aanverwanten niet kunnen terugvinden, ... Dit facet van een evacuatie wordt verder besproken in paragraaf 5.4.1 p. 69.

- Bij meer langdurige ontruimingën ontstaan **secundaire problemen** zoals bevoorrading in voedsel en drank, medicatie, achtergelaten huisdieren, reservekledij, enz.
- Verder moet er absolute aandacht zijn voor het **gecontroleerd open stellen van geëvacueerde gebieden**. Daarom lijkt het aangewezen om naast opschalen, ook duidelijk aandacht te geven voor het afschalen tijdens de nazorg.
- Tenslotte blijkt dat er bij rampoefeningen doorgaans veel aandacht gaat naar de operationele aspecten, die blijkbaar vlot gaan. Het grote knelpunt blijkt immers een massale evacuatie. **Meer aandacht naar evacuatie bij rampoefeningen** is essentieel.

Bijlage B

Bestaande evacuatiemodellen en -pakketten

B.1 NETSIM

Het microscopisch model NETSIM werd niet specifiek opgesteld als een evacuatiemodel, maar werd begin jaren '80 wel gebruikt om evacuatietijden te schatten rond kerncentrales (Wilmot & Mei, 2003, p. 3). NETSIM kan gebruikt worden om de verkeersafwikkeling te simuleren bij verschillende verkeersmanagementsstrategieën en bij grote verkeersvraag. Het vergt wel een erg gedetailleerde voorstelling van het wegennetwerk en de (tijdsafhankelijke) verkeersvraag moet als input ingevoerd worden. Daardoor is NETSIM onpraktisch voor grotere verkeersnetwerken (Sattayhatewa & Ran, 2000, p. 5). Ander nadeel is het ontbreken van een dynamisch routekeuzemodel: de route van elk voertuig dient a priori vastgelegd (Mei, 2002, p. 19).

B.2 NETVAC

NETVAC (NETwork Emergency EVACuation Simulation) is een macroscopisch model, specifiek opgesteld om evacuaties rond kerncentrales te simuleren (Sattayhatewa & Ran, 2000, p. 5). Het geeft informatie over het vormen van wachtrijen (congestie) en gebruikt een dynamisch routekeuzemodel (Alsnih & Stopher, 2004, p. 8). Daar het een macroscopisch model is en men dus niet voertuigen afzonderlijk beschouwd, is het mogelijk de analyse uit te voeren op grote verkeersnetwerken. Daarenboven biedt het de mogelijkheid een aantal factoren aan te passen zoals het weer, controlemaatregelen op kruispunten en andere verkeersmanagementsstrategieën (Alsnih & Stopher, 2004, p. 8). Ook hier moet, naast de beschrijving van het netwerk, het vraagpatroon ingevoerd worden. De uitvoer omvat voornamelijk informatie over snelheden, intensiteiten en wachtrijen voor elke link en voor elk beschouwd tijdsinterval (Mei, 2002, p. 20).

B.3 DYNEV & I-DYNEV

Net zoals NETVAC is DYNEV (Dynamic Network Evacuation Computer Model) een macroscopisch model en werd het begin jaren '80 ontwikkeld voor evacuaties rond kerncentrales (Wilmot & Mei, 2003, p. 3). Het is een van de meest gekende evacuatiemodellen (Sattayhatewa & Ran, 2000, p. 5).

DYNEV gebruikt een statische evenwichtstoedeling (Fu, 2004, p. 5). Als invoer vergt dit model voor elke link het aantal voertuigen in functie van de tijd dat het netwerk via die link oprijdt. De uitvoer bestaat uit gedetailleerde informatie over snelheden, intensiteiten en dichtheden voor elke link en is uiterst geschikt om bottlenecks te lokaliseren langsheen de evacuateroutes.

I-DYNEV is een update van DYNEV met een aantal verbeterde operationele karakteristieken, waardoor de rekentijd aanzienlijk kleiner wordt. Ook wordt het mogelijk een aantal verkeersmanagementsstrategieën te implementeren (Mei, 2002, p. 21).

B.4 MASSVAC

MASSVAC is eveneens een macroscopisch evacuatiemodel, maar niet enkel voor evacuaties rond kerncentrales. Zo werd het gebruikt voor het opstellen van de bij een dreigende orkaan te activeren evacuatieplannen van de stad Virginia Beach (Wilmot & Mei, 2003, p. 3).

MASSVAC is in staat om de verkeersstromen op het hoofdwegenet te simuleren, de meest efficiënte evacuateroutes en/of routes naar schuilplaatsen te identificeren en de totale evacuatietijd te schatten (Church & Sexton, 2002, p. 5). Dit model bestaat uit 3 modules (Alsnih & Stopher, 2004, p. 8):

- *community and disaster characteristics* module: definieert het bedreigde gebied en de eigenschappen van de dreigende (natuurlijke) ramp;
- *population distribution and characteristics* module: bepaalt de geografische verdeling van de evacuatiebevolking voor verschillende tijdstippen van de dag;
- *network evacuation* module: simuleert de verkeersafwikkeling van de evacuatie op basis van de resultaten van de eerste twee modules, geeft het verloop van intensiteit, snelheid, reistijd, congestie, enz. op de verschillende links aan en schat dan de evacuatietijd.

De delen van het netwerk waar het meest congestie optreedt kunnen gelokaliseerd worden. Door een aantal aanpassingen door te voeren, kan men trachten de voorspelde congestie te reduceren om zo te komen tot een optimaal evacuatieplan. Het is bijvoorbeeld mogelijk een aantal verkeersmanagementsmaatregelen te implementeren in MASSVAC.

Het nadeel is dat de voorspelde evacuatielijd steeds een onderschatting is omdat enkel het hoofdwegenet wordt beschouwd (Alsni & Stopher, 2004, p. 8). De tijd die nodig is om zich van de woning naar de dichtstbijzijnde hoofdweg te begeven, wordt niet in rekening gebracht. Het is daarenboven niet onwaarschijnlijk dat er ook op het onderliggend wegennet aanzienlijke congestie optreedt. Dit fenomeen zit echter op geen enkele manier vervat in MASSVAC.

In Hobeika & Kim (1998) wordt de overgang van MASSVAC 3.0 naar MASSVAC 4.0 besproken. De upgrade houdt in dat een ander toedelingsmodel wordt toegepast. Dit werd reeds besproken in paragraaf 5.4.5.

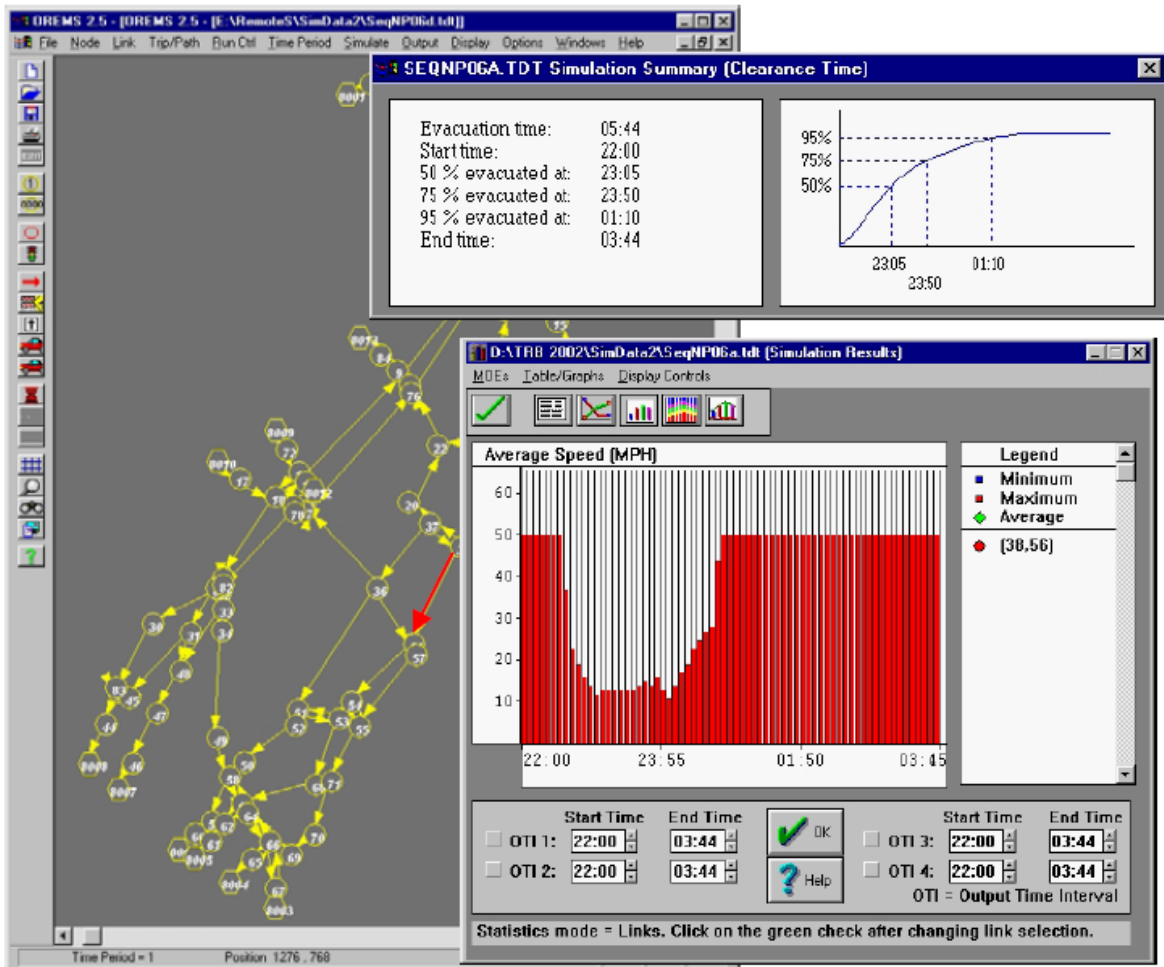
B.5 OREMS

Het Oak Ridge Evacuation Modeling System (OREMS) is een commercieel softwarepakket met een grafische user interface (GUI). OREMS is uiterst geschikt voor het opstellen van evacuatieplannen. Het kan namelijk gebruikt worden voor het (Franzese, 2002):

- modelleren van enorm grote netwerken (evacuatiegebieden van duizenden vierkante kilometers vormen geen probleem);
- bepalen van de haalbaarheid van een evacuatie zonder voorafgeplande routes;
- identificeren van de beste evacuatielroutes;
- identificeren van bottlenecks;
- onderzoeken van de effectiviteit van alternatieve evacuatie- en verkeersmanagementsstrategieën;
- schatten van het verloop van snelheid, dichtheid, ... op alle links;
- schatten van de evacuatielijd voor het ganse netwerk of bepaalde delen ervan.

OREMS is opgebouwd uit drie componenten: een *input data manager*, een verkeersmodel "*Evacuation SIMulations*" (ESIM) en een *output display manager* (Pal *et al.*, 2003, p. 5). Als input dienen zowel het verkeersnetwerk als de tijdsafhankelijke verkeersvraag ingevoerd te worden (Pal *et al.*, 2003, p. 6). De output wordt weergegeven als ruwe data, tabellen of in grafische vorm (zowel statisch als dynamisch). Een voorbeeld van output is te zien in figuur B.1 (Franzese & Sorensen, 2003, p. 4).

De kern van OREMS is ESIM, een in FORTRAN geprogrammeerd verkeersmodel. Dit model maakt gebruik van een procedure die distributie (bestemmingskeuze) en toedeling (routekeuze) combineert (Wilmot & Mei, 2003, p. 3). De toedeling gebeurt dynamisch.



Figuur B.1: Voorbeeld van output van OREMS

Microsimulatie gebaseerd op het (door het FHWA ontwikkelde) TRAF simulatiesysteem wordt gebruikt om de verkeersstromen over het netwerk te simuleren (Wilmot & Mei, 2003, p. 3).

Er werden reeds heel wat voorstellen geformuleerd om OREMS uit te breiden of te koppelen aan andere modules.

Zo wordt in Pal *et al.* (2003) een GIS-softwarepakket (ArcView 3.2) gekoppeld aan OREMS om een evacuatiemodel te verkrijgen waarbij GIS wordt gebruikt om het verkeersnetwerk én de bevolking nauwkeurig te bepalen. Die gegevens dienen als input in OREMS, dat het effect van de evacuatie op het verkeersnetwerk dan modelleert.

In Franzese & Sorensen (2003) gaat men nog een stap verder en wordt OREMS ingeschakeld in een Intelligent Consequence Management (ICM) systeem. Dit is een systeem dat wordt ingeschakeld voor de rampenbestrijding. Het maakt gebruik van moderne sensortechnologie en (draadloze) communicatie gekoppeld aan real-time simulatie en beslissingsondersteunende modellen.

Franzese & Xiong (2002) behandelen een andere mogelijke uitbreiding van OREMS: het invoeren van real-time data in OREMS. Het is nl. zo dat bijvoorbeeld tengevolge van wegenwerken of een ongeval de capaciteit van een bepaalde weg sterk afneemt, waardoor de reële situatie niet meer overeenstemt met deze die in OREMS werd ingevoerd. Idealiter zou het uit te voeren evacuatieplan hiervoor moeten aangepast worden. Daartoe worden in OREMS algoritmes en functies toegevoegd die op basis van de real-time ontvangen informatie de evacuatieplannen in de mate van het mogelijke aanpassen en de evacuatiemanagers waarschuwen. Merk hier nogmaals het belang op van ITS, zoals reeds aangegeven in paragraaf 3.3.2.

B.6 ETIS

Na orkaan Floyd werd aan het studie bureau PBS&J de opdracht gegeven een studie uit te voeren met als doel toekomstige evacuaties beter te kunnen managen. Eén van de conclusies van deze studie, de Southeast US Hurricane Evacuation Study, was dat de communicatie tussen de verschillende staten aan de oostkust diende verbeterd. Om dit te realiseren werd het Evacuation Traffic Information System (ETIS) ontwikkeld, vroeger ook wel het Travel Demand Forecast Model (TDFM) genoemd (Palmer, 2001).

ETIS is een GIS- en internet-gebaseerd model dat de verkeersvraag schat voor evacuaties bij orkanen. Daartoe gebruikt ETIS default waarden voor participation rates (zie 5.4.2), die afhankelijk zijn van de categorie van orkaan, het type evacuatie, het geschatte aantal aanwezige toeristen, verkeerstelgegevens, ... (Wilmot & Mei, 2003, p. 3). Deze en andere real-time data worden door een verantwoordelijke van elke staat via internet ingebracht. Alle staten langs de oostkust kunnen inloggen in deze toepassing (<http://www.fhwaetis.com>) en on-line de meest recente gegevens inladen. Op die manier kan het evacuatieproces over de

staatsgrenzen heen gemonitord en bijgevolg beter gemanaged worden. Bij vroegere evacuaties, zoals bij Floyd, waren de staten afzonderlijk door de slechte communicatie niet in staat te anticiperen op het verkeer afkomstig van naburige staten (Lewis, 2001), wat mee aan de basis lag van de enorme verkeerschaos.

Als output geeft ETIS (PBS&J, 2005): voorspellingen van verkeersvolumes, te verwachten congestieniveaus per segment van de hoofdwegen, tabellen met aantallen voertuigen die de staatsgrenzen zullen overschrijden, een vergelijking tussen voorspelde en waargenomen verkeerstellingen en informatie per evacuatieroute (aantal beschikbare rijstroken, congestie). Op de website bevinden zich, naast het beveiligde systeem, verder nog de gepubliceerde delen van voormelde studie en talrijke interessante links, waaronder deze naar alle *state emergency agencies*.

B.7 Evacuatiemodel in het DSS Emergency Planning

Het evacuatiemodel geeft een schatting van de tijd nodig voor de evacuatie van het gebied Voorne-Putten in de provincie Zeeland. Deze schatting is gebaseerd op de aanname dat de evacuatie gefaseerd en georganiseerd zal verlopen, waarbij de inwoners individueel advies wordt gegeven over hun vertrektijdstip en evacuatieroute.

Het uitgangspunt is de evacuatie zodanig te plannen dat er nergens congestie zal optreden op het wegennet. Voordelen daarvan zijn:

- afname totale evacuatietijd: de capaciteit van het verkeersnetwerk ligt bij congestie lager t.g.v. de capaciteitsval (*capacity drop*, zie Immers & Logghe (2002, p. 35)) die optreedt bij congestie;
- afname individuele reistijd voor alle evacués: de individuele evacués worden nergens beperkt in hun snelheid;
- vermijden van chaotische verkeerssituaties.

Het gebied wordt ingedeeld in een aantal zones, waarvan alle inwoners hetzelfde route-advies naar dezelfde uitgang zullen krijgen. Voor elke zone worden die uitgang (*exit-point*) en de te volgen route daarheen bepaald op basis van het minimaliseren van de reistijd in free flow omstandigheden. Dit zorgt ervoor dat de inwoners meer geneigd zullen zijn het route-advies op te volgen. Mogelijk leidt dit echter tot een ongelijkmatige verdeling van de verkeersvraag over de verschillende uitgangen. Daarom kan het model ook de exit-points en routes van enkele zones wijzigen zodat de ontruimingstijd voor alle uitgangen zoveel mogelijk aan mekaar gelijk zijn.

Om free flow op het netwerk te garanderen, mag op geen enkel moment een route een hogere instroom krijgen dan de capaciteit van de schakel met de laagste capaciteit op die route.

Op basis daarvan wordt over alle routes in het netwerk teruggerekend wat het maximale uitstroomprofiel van elke zone is en welke de bijhorende vertrektijdstoppen van de inwoners zijn.

Het model kan vervolgens het tijdsverloop bepalen van de intensiteiten op alle schakels en de uitstroomintensiteiten van alle exit-points. Op basis daarvan kan dan de totale evacuatietijd bepaald worden en kunnen de mogelijke knelpunten in het netwerk geïdentificeerd worden door voor alle schakels de intensiteiten te vergelijken met de capaciteiten.

Het model is eveneens in staat om een optimale trajectplanning op te stellen voor de bussen die instaan voor de evacuatie van het gedeelte van de bevolking dat geen wagen bezit.

Tenslotte bevat het model ook een module voor de opvang in het bedreigde gebied zelf. Door vergelijking van de beschikbare met de geschatte benodigde tijd voor evacuatie, bepaalt het model welk deel van de bevolking niet tijdig zal kunnen evacueren. Voor dat deel wordt dan een routekeuze bepaald naar één van de vooraf opgegeven opvangpunten in het gebied zelf. Vervolgens wordt de totale evacuatietijd geschat waarbinnen iedereen ofwel het gebied heeft verlaten ofwel een opvangpunt heeft bereikt.

B.8 Evacuatie Calculator in het HIS

In opdracht van Rijkswaterstaat heeft de universiteit van Twente een methode ontwikkeld om het verloop van een preventieve evacuatie in te schatten. Deze methode werd geïmplementeerd in de Evacuatie Calculator, die op termijn zal geïntegreerd worden in het Hoogwater Informatie Systeem (zie paragraaf 4.2.3). Deze Evacuatie Calculator (EC) kent twee mogelijke toepassingen:

- ontwikkelen van het nationale beleid inzake evacuaties: door voor alle dijkkringgebieden de evacuatietijd te schatten kunnen de meest risicovolle dijkkringgebieden geïdentificeerd worden;
- ontwikkelen en uitwerken van evacuatieplannen voor elk dijkkringgebied afzonderlijk.

De EC beschrijft het verloop van een preventieve evacuatie vanaf het ogenblik waarop de evacuatieoproep wordt verspreid. Daarbij worden drie tijdselementen onderscheiden: het vertrekprofiel per categorie evacués, het aankomstprofiel van voertuigen bij de uitgang en het uitstroomprofiel van voertuigen door de uitgang.

De EC werkt samen met een standaard macroscopisch verkeersmodel, nl. OmniTRANS. De ritgeneratie en de ritdistributie worden uitgewerkt in de EC, terwijl OmniTRANS wordt ingeschakeld voor de toedeling.

De *ritgeneratie* gebeurt op basis van een gebiedsindeling met gebieden ter grootte van een gemeente.

Kern van de EC is de *ritdistributie*, hetgeen aangeeft naar welke uitgangen de evacués zich zullen begeven. Gekozen kan worden tussen vier verschillende ontruimingsstrategieën:

- referentiestrategie: de evacués zijn volledig vrij wat betreft de bestemmingskeuze;
- strategie “nabij”: de evacués gaan naar de meest nabijgelegen uitgang;
- strategie “verkeersmanagement”: de bestemmingskeuze wordt zodanig beïnvloed dat de capaciteiten van de verschillende uitgangen gelijkmatig benut worden en het aantal voertuigkilometers zo klein mogelijk gehouden wordt;
- strategie “uitstroomgebied”: de gebruiker van de EC kan ook zelf uitgangen toekennen aan de evacués, bv. om rekening te houden met de actuele lokale omstandigheden.

De *toedeling* (met OmniTRANS) is een alles-of-niets toedeling: alle verkeer wordt aan de kortste route toegekend zonder rekening te houden met de daarmee gepaard gaande capaciteitseffecten.

B.9 Andere

Er werden nog talrijke andere evacuatiemodellen ontwikkeld. We vermelden er enkele uit het begin van de jaren '80: EVAC PLAN PACK Model, CLEAR NESSY IV (Sattayhatewa & Ran, 2000, p. 5). Het evacuatiemodel TEVACS uit 1990 bestudeert grootschalige evacuaties in grootsteden in Taiwan en houdt expliciet rekening met het feit dat de auto niet veruit de meest gebruikte mode is in grootsteden (Church & Sexton, 2002, p. 5). Tenslotte verdient ook het Regional Evacuation Modeling System (REMS) uit 1990 een vermelding. Dit model, dat de evacuatietijd en de verkeersstromen op een gegeven verkeersnetwerk schat, wordt besproken in Tufekci (1995), vooral dan hoe het ingepast wordt in een beslissingsondersteunende software.

B.10 Opmerkingen

B.10.1 Decision Support Systems (DSS)

Zoals ook bleek uit paragraaf B.7 kunnen de hierboven besproken evacuatiemodellen ingeschakeld worden in beslissingsondersteunende systemen. Deze systemen trachten de *emergency managers* bij te staan bij vragen zoals: gegeven de ontwikkeling van een orkaan, waar en wanneer bereikt deze de kust en hoeveel tijd is er nodig om het bedreigde gebied te evacueren? Waar moet zeker personeel geplaatst worden voor een vlottere verkeersafwikkeling en waar situeren zich de grootste knelpunten? In welke mate neemt de evacuatietijd toe indien we een naastliggend gebied ook evacueren?

Een DSS bevat meer dan enkel en alleen een evacuatiemodel. Zo bevat het meestal ook een GIS-database. In Alsnih & Stopher (2004, p. 12-14) wordt een overzicht gegeven van de bestaande DSS.

B.10.2 Case studies

In de literatuur zijn heel wat studies terug te vinden die verkeerssimulatie gebruiken om het gedrag van een verkeersnetwerk bij evacuaties te onderzoeken of om een aantal zaken uit te testen. We bespreken hier kort een aantal van dergelijke studies. Het is echter niet de bedoeling een zo volledig mogelijk overzicht te geven.

Cova & Johnson (2003) presenteren een verkeersstroommodel voor het selecteren van de optimale “*lane-based routing*” evacuatieplannen in een complexe netwerkstructuur. De meeste verkeersopstoppingen doen zich voor ter hoogte van kruispunten en invoegstroken. Het is mogelijk de vertragingen te beperken door het aantal (kruisende en invoegende) conflicten te reduceren. Dit noemt men een lane-based routing. Nadeel hiervan is dat de af te leggen afstand door elk individu aanzienlijk zal toenemen. In deze studie wordt getracht het optimum te bepalen.

Chen (2003) onderzocht voor verschillende netwerkstructuren (gridstructuur, ringstructuur, reëel netwerk) het verschil tussen gefaseerde en simultane evacuaties. Als criterium wordt de totale evacuatielijd beschouwd. Er wordt geconcludeerd dat in free flow een simultane evacuatie te verkiezen valt en bij congestie de gefaseerde evacuatie. Dit laatste geldt zeker bij een gridstructuur, bij de andere netwerkstructuren is het verschil beperkt. Er wordt wel op gewezen dat de gefaseerde evacuatiestrategie een aantal voordelen met zich meebrengt. Ten eerste is de individuele reistijd van heel wat huishoudens beperkter, waardoor er minder blootstelling is aan het gevaar (bv. gifwolk). Ten tweede is de verkeersdruk minder ernstig, waardoor de kans op ongevallen gereduceerd wordt, hetgeen zeer belangrijk is bij evacuaties.

In Cova & Johnson (2002) en Church & Sexton (2002) worden modellen opgebouwd specifiek voor evacuaties van kleinere gebieden (enkele gemeenten of kleine steden) die kwetsbaar zijn voor overslaande bosbranden. Er wordt in beide studies gebruik gemaakt van het microscopisch verkeersmodel PARAMICS. Ook worden telkens een aantal scenario's getest wat betreft aantal voertuigen per huishouden, tijdsprofiel van de vraag, verschillende verkeersmanagementsstrategieën, extra wegen, alternatieve uitgangen, ...

Ook naar contraflow werd onderzoek verricht. In Theodoulou & Wolshon (2004) test men met het microscopische model CORSIM een aantal configuraties voor de evacuatie van New Orleans. Men onderstreept het enorme belang van degelijke planning en ontwerp van contraflow, vooral dan de beginpunten. Er blijkt uit het onderzoek namelijk dat door enkele goedkope en simpele maatregelen grote verbeteringen kunnen aangebracht worden aan de bestaande configuratie.

In Tuydes & Ziliaskopoulos (2004) wordt specifiek ingegaan op het gebruik van contraflow om

de beschikbare capaciteit van het netwerk optimaal te benutten bij ongewone vraagpatronen, meer bepaald bij evacuaties. Men introduceert een evacuatiemodel gebaseerd op een uitbreiding van het *Cell Transmission Model (CTM)*, een mesoscopisch verkeersstroommodel. Het voorgestelde model bepaalt de optimale “*capacity reversibility*”, m.a.w. welke combinatie van schakels in het netwerk best wordt omgedraaid om de totale evacuatietijd te minimaliseren. In de case study van hoofdstuk 6 wordt hetzelfde probleem onderzocht.

Bijlage C

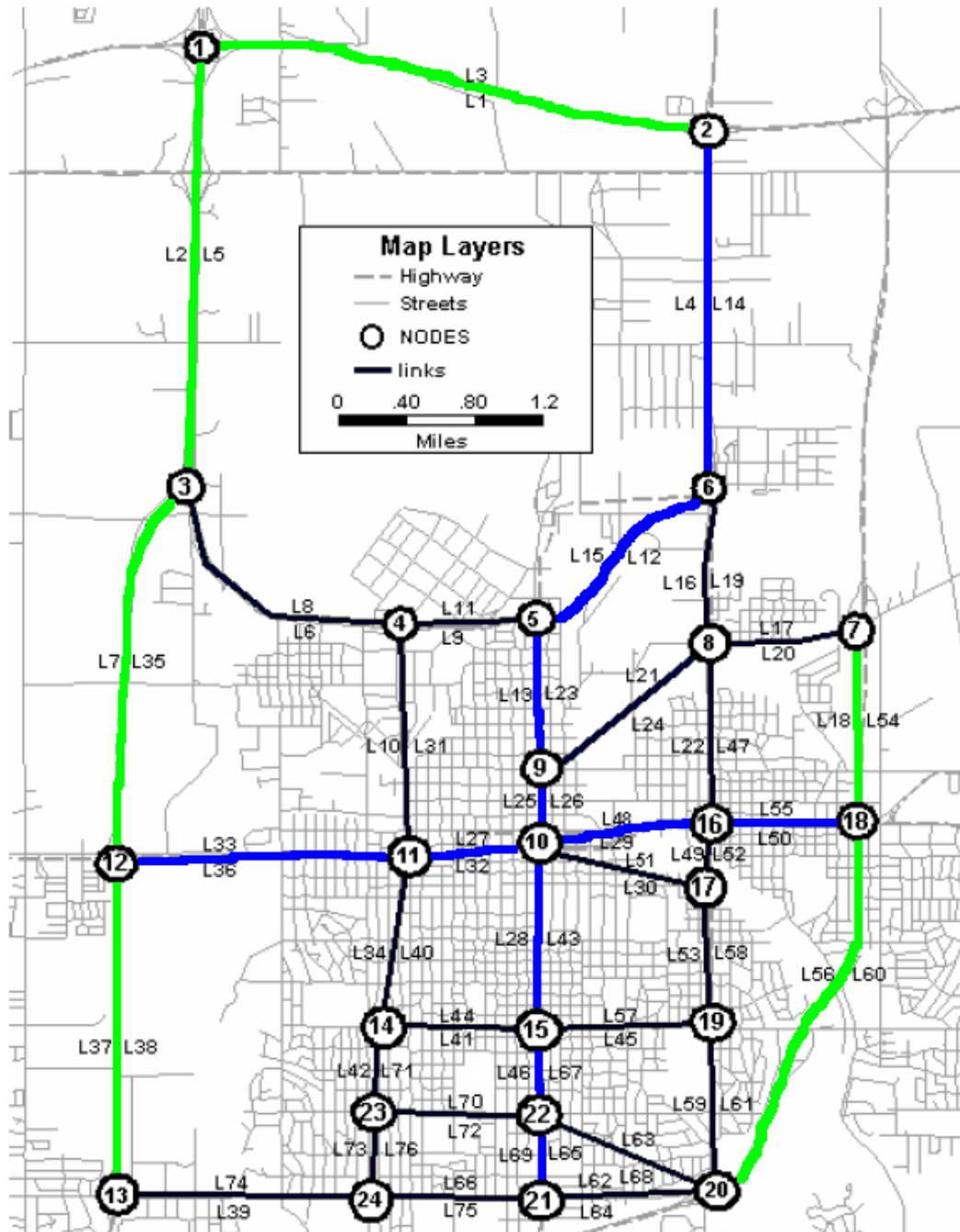
Sioux Falls

C.1 Opbouw

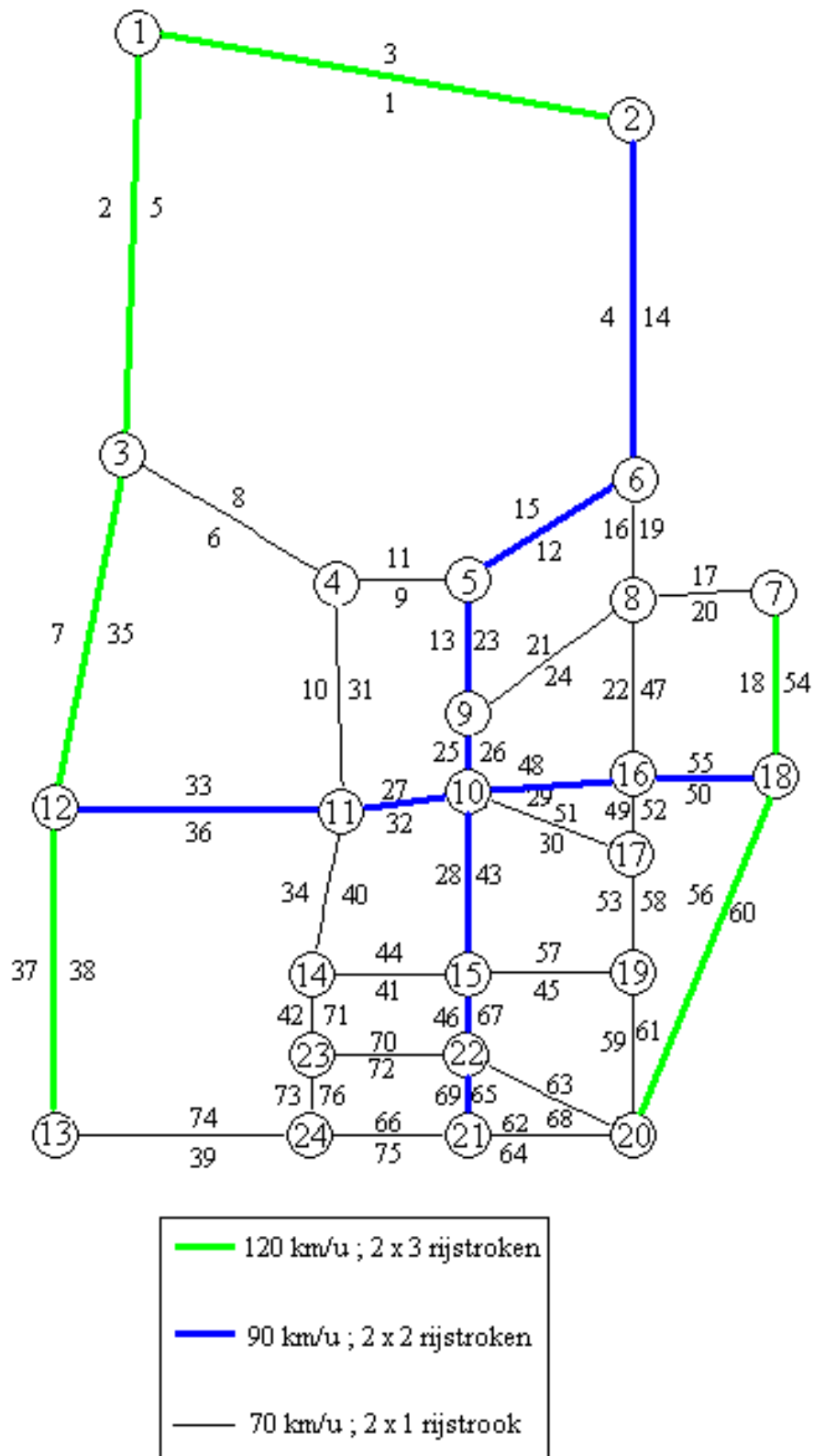
De algemene netwerkopbouw werd reeds getoond in figuur 6.1. In figuur C.1 (bron: Davis & Sanderson (2001, p. 39)) is te zien hoe het bestaande wegennet van Sioux Falls kan geschematiseerd worden tot het gekende netwerk van figuur C.2.

C.2 Netwerkgegevens

In tabel C.1 worden de coördinaten van de 24 knopen van het netwerkje aangegeven. In tabellen C.2 en C.3 worden volgende eigenschappen van de 76 links weergegeven: beginknoop, eindknoop, lengte, maximale dichtheid (*jam density*), capaciteit en snelheid in free flow. De maximale dichtheid en capaciteit zijn per rijstrook gelijk aan respectievelijk 140 vtg/km en 1800 vtg/u.



Figuur C.1: Het wegennet van Sioux Falls



Figuur C.2: Het geschematiseerde netwerk van Sioux Falls

Tabel C.1: Knoopgegevens Sioux Falls

knoop	x [km]	y [km]
1	0.9	12.0
2	6.2	11.0
3	0.8	7.4
4	3.0	6.1
5	4.4	6.1
6	6.2	7.2
7	7.7	5.9
8	6.2	5.8
9	4.4	4.5
10	4.4	3.7
11	3.1	3.5
12	0.0	3.5
13	0.0	0.0
14	2.8	1.8
15	4.4	1.8
16	6.2	3.9
17	6.2	3.1
18	7.7	3.9
19	6.2	1.8
20	6.2	0.0
21	4.4	0.0
22	4.4	0.9
23	2.8	0.9
24	2.8	0.0

Tabel C.2: Linkgegevens Sioux Falls (links 1 t.e.m. 38)

link-nummer	begin-knoop	eind-knoop	lengte [km]	maximale dichtheid [vtg/km]	capaciteit [vtg/u]	ff-snelheid [km/u]
1	1	2	5.37	420	5400	120
2	1	3	4.62	420	5400	120
3	2	1	5.37	420	5400	120
4	2	6	3.85	280	3600	90
5	3	1	4.62	420	5400	120
6	3	4	2.57	140	1800	70
7	3	12	3.93	420	5400	120
8	4	3	2.57	140	1800	70
9	4	5	1.43	140	1800	70
10	4	11	2.53	140	1800	70
11	5	4	1.43	140	1800	70
12	5	6	2.08	280	3600	90
13	5	9	1.54	280	3600	90
14	6	2	3.85	280	3600	90
15	6	5	2.08	280	3600	90
16	6	8	1.32	140	1800	70
17	7	8	1.54	140	1800	70
18	7	18	2.09	420	5400	120
19	8	6	1.32	140	1800	70
20	8	7	1.54	140	1800	70
21	8	9	2.20	140	1800	70
22	8	16	1.98	140	1800	70
23	9	5	1.54	280	3600	90
24	9	8	2.20	140	1800	70
25	9	10	0.77	280	3600	90
26	10	9	0.77	280	3600	90
27	10	11	1.34	280	3600	90
28	10	15	1.98	280	3600	90
29	10	16	1.76	280	3600	90
30	10	17	1.88	140	1800	70
31	11	4	2.53	140	1800	70
32	11	10	1.34	280	3600	90
33	11	12	3.08	280	3600	90
34	11	14	1.79	140	1800	70
35	12	3	3.93	420	5400	120
36	12	11	3.08	280	3600	90
37	12	13	3.52	420	5400	120
38	13	12	3.52	420	5400	120

Tabel C.3: Linkgegevens Sioux Falls (links 39 t.e.m. 76)

link-nummer	begin-knoop	eind-knoop	lengte [km]	maximale dichtheid [vtg/km]	capaciteit [vtg/u]	ff-snelheid [km/u]
39	13	24	2.75	140	1800	70
40	14	11	1.79	140	1800	70
41	14	15	1.65	140	1800	70
42	14	23	0.88	140	1800	70
43	15	10	1.98	280	3600	90
44	15	14	1.65	140	1800	70
45	15	19	1.76	140	1800	70
46	15	22	0.88	280	3600	90
47	16	8	1.98	140	1800	70
48	16	10	1.76	280	3600	90
49	16	17	0.77	140	1800	70
50	16	18	1.54	280	3600	90
51	17	10	1.88	140	1800	70
52	17	16	0.77	140	1800	70
53	17	19	1.32	140	1800	70
54	18	7	2.09	420	5400	120
55	18	16	1.54	280	3600	90
56	18	20	4.15	420	5400	120
57	19	15	1.76	140	1800	70
58	19	17	1.32	140	1800	70
59	19	20	1.76	140	1800	70
60	20	18	4.15	420	5400	120
61	20	19	1.76	140	1800	70
62	20	21	1.76	140	1800	70
63	20	22	1.97	140	1800	70
64	21	20	1.76	140	1800	70
65	21	22	0.88	280	3600	90
66	21	24	1.65	140	1800	70
67	22	15	0.88	280	3600	90
68	22	20	1.97	140	1800	70
69	22	21	0.88	280	3600	90
70	22	23	1.65	140	1800	70
71	23	14	0.88	140	1800	70
72	23	22	1.65	140	1800	70
73	23	24	0.88	140	1800	70
74	24	13	2.75	140	1800	70
75	24	21	1.65	140	1800	70
76	24	23	0.88	140	1800	70

Bijlage D

Link Transmission Model

In deze bijlage geven we een meer gedetailleerde beschrijving van het LTM, gebaseerd op Yperman *et al.* (2005).

D.1 Verkeersstroommodellen

Verkeersstroommodellen beschrijven, bij een gegeven verkeersvraag of bij een bepaalde set van begin- en randvoorwaarden, de evolutie van de verkeersstoestand in een verkeersnetwerk.

In Lighthill & Whitham (1955) werd een theorie beschreven van een eendimensionale golfbeweging, dewelke kan toegepast worden op een aantal types vloeistof én op verkeersstromen op een autosnelweg. Onafhankelijk hiervan stelde Richards (1956) een gelijkaardige theorie voor verkeersstromen voor. Deze kinematische golftheorie is ook gekend als de Lighthill-Whitham-Richards- of (LWR)-theorie. De theorie is gebaseerd op de verkeersbehoudswet, waarin vervolgens een relatie tussen de intensiteit q [vtg/u] en de dichtheid k [vtg/km] wordt ingebracht. Deze relatie wordt het fundamenteel diagram genoemd. Typisch wordt een driehoekig fundamenteel diagram gebruikt, zoals verder in deze paragraaf getoond in figuur D.1. De behoudswet luidt in zijn meest eenvoudige vorm (geen in- of uitstroom via op- of afritten) als volgt:

$$\frac{\partial k(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} = 0 \quad (\text{D.1})$$

Met dit model van verkeersstromen kunnen dynamische verkeersstostanden beschreven worden, met inbegrip van schokgolven en de voortplanting van wachtrijen (zie bv. Immers & Logghe (2002)). De oplossing kan gevonden worden met analytische en grafische methodes. In plaats van deze theorie (combinatie van de behoudswet met het fundamenteel diagram) te gebruiken ter bepaling van de densiteit en de intensiteit, gebruikt Newell (1993) deze theorie om, op analytische of grafische wijze, cumulatieve functies te bepalen. Een cumulatieve functie beschrijft het cumulatief aantal voertuigen dat voorbijgereden is op een bepaalde plaats x in

het netwerk in functie van de tijd. Deze voorstelling laat toe om eenvoudig reistijden af te leiden, zoals reeds aangetoond in figuur 6.4.

De analyse van Newell (1993) is echter beperkt tot een autosnelweg met eventueel één of meerdere op- en afritten. Voor complexe netwerken worden voorgaande methoden onhandelbaar. Daarom dient een numerieke procedure te worden geïmplementeerd op een computer. Zulke numerieke procedure werd o.a. voorgesteld door Daganzo (1995). Zijn *Cell Transmission Model (CTM)* is een discrete versie van de hierboven aangehaalde continue kinematische golfmodellen. Een link wordt opgedeeld in een aantal cellen en voor elke tijdstap wordt het aantal voertuigen bepaald dat zich in een cel bevindt, net zoals de stromen tussen de verschillende cellen. Aangevuld met knoopmodellen laat dit toe om de dynamische verkeersstoestand in het verkeersnetwerk te bepalen.

Het *Link Transmission Model* houdt een nieuwe discrete formulering in van de kinematische golftheorie. Het LTM vereist, in tegenstelling tot het CTM, enkel berekeningen van de cumulatieve functies aan de uiteinden van elke link. De dynamische verkeersstoestand kan vervolgens afgeleid worden uit deze cumulatieve functies.

D.2 Uitwerking oplossingsmethode LTM

De algemene beschrijving van de oplossingsmethode van het LTM werd reeds aangegeven in paragraaf 6.2.2. Hier werken we deze verder uit.

D.2.1 Algemeen

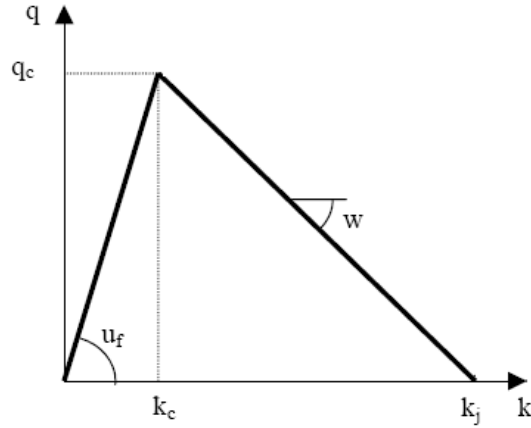
Zoals reeds aangegeven, wordt er aangenomen dat het verkeer zich op een link voortbeweegt volgens de kinematische golftheorie, die gebaseerd is op de verkeersbehoudswet. Zoals aangetoond door Newell (1993) geldt de verkeersbehoudswet (d.w.z. voertuigen worden niet gecreëerd of verdwijnen niet) in een bepaalde ruimte $(\Delta x, \Delta t)$ langsheen een homogene link indien er in die ruimte een cumulatieve functie $N(x, t)$ bestaat. Immers, indien de cumulatieve functie en zijn eerste afgeleiden bestaan, geldt:

$$\frac{\partial^2 N(x, t)}{\partial x \partial t} = \frac{\partial^2 N(x, t)}{\partial t \partial x} \quad (\text{D.2})$$

Uit de definitie van de cumulatieve functies volgt:

$$\frac{\partial N(x, t)}{\partial t} = q(x, t) \quad (\text{D.3})$$

$$-\frac{\partial N(x, t)}{\partial x} = k(x, t) \quad (\text{D.4})$$



Figuur D.1: Driehoekig fundamenteel diagram

Invullen van (D.3) en (D.4) in (D.2) levert onmiddellijk de verkeersbehoudswet, zoals in (D.1). In een gebied $(\Delta x, \Delta t)$ waar deze behoudswet geldt, kan het theorema van Green worden toegepast:

$$N(x_2, t_2) - N(x_1, t_1) = \int_C dN(x, t) = \int_C \frac{\partial N(x, t)}{\partial t} dt + \frac{\partial N(x, t)}{\partial x} dx = \int_C q dt - k dx \quad (\text{D.5})$$

waarbij C een willekeurige curve is van (x_1, t_1) naar (x_2, t_2) .

Het tweede basisprincipe van de kinematische golftheorie is het aannemen van een verband $q(k)$, d.i. het fundamenteel diagram. In het LTM wordt een driehoekig fundamenteel diagram verondersteld, zoals getoond in figuur D.1. Zulk fundamenteel diagram wordt bepaald door drie parameters: de *free flow* snelheid u_f , de maximale intensiteit of capaciteit q_c (bij een kritieke dichtheid k_c) en de *jam density* of maximale dichtheid k_j . Indien de dichtheid kleiner is dan k_c bewegen de voertuigen zich voort tegen een snelheid u_f . Is de dichtheid groter, dan treedt congestie op.

Combinatie van de verkeersbehoudswet (D.1) en het fundamenteel diagram beschrijven de evolutie van de verkeerstoestand in het netwerk. Met het driehoekige fundamenteel diagram zijn slechts twee waarden van de golfsnelheid mogelijk: een positieve (u_f) voor *free flow* verkeerstoestanden en een negatieve (w) voor verkeerstoestanden in congestie. De verkeerstoestand in elk punt (x, t) kan bijgevolg afgeleid worden uitgaande van randvoorwaarden op vroegere tijdstippen.

De numerieke procedure verdeelt de simulatieperiode in een aantal tijdsintervallen. Voor elk tijdsinterval worden twee stappen uitgevoerd:

- Voor elke **link** wordt enerzijds de *sending flow* aan het afwaarts einde en anderzijds de *receiving flow* aan het opwaartse einde bepaald. De sending flow is het maximum

aantal voertuigen dat naar een volgende link kan gestuurd worden in het geval dat die volgende link een oneindige capaciteit zou hebben. De receiving flow daarentegen is het maximum aantal voertuigen dat kan verwerkt worden door de link in het geval van een oneindige vraag.

- De **knoop**modellen bepalen welke gedeelten van deze sending en receiving flows werkelijk kunnen gezonden/verwerkt worden. Deze knoopmodellen transfereren eigenlijk de voertuigen van opwaartse (sending) naar afwaartse (receiving) links en actualiseren tegelijkertijd de waarde van de cumulatieve functies aan de uiteinden van de links verbonden met desbetreffende knoop.

In de volgende paragrafen worden achtereenvolgens de sending flows, de receiving flows en de knoopmodellen besproken.

D.2.2 Sending flows

De *sending flow* van link i op tijdstip t is gedefinieerd als de uitstroom uit deze link tussen tijdstip t en $t + \Delta t$ in het geval van een oneindig groot reservoir afwaarts van het uiteinde x_i^L . De sending flow is echter begrensd door de opwaartse randvoorwaarden op vroegere tijdstippen: free flow verkeerstoestanden aan het opwaarts uiteinde x_i^0 bereiken $\frac{L_i}{u_f}$ tijdseenheden later het afwaartse uiteinde x_i^L , aangezien zulke verkeerstoestanden zich voortbewegen met een positieve golfsnelheid u_f . Het verschil tussen de cumulatieve functies in deze twee punten op de vermelde tijdstippen is gelijk aan 0 (gebruik (D.5) met $k < k_c$ en q beiden constant):

$$N(x_i^0, t + \Delta t - \frac{L_i}{u_f}) - N(x_i^L, t + \Delta t) = q(-\frac{L_i}{u_f}) - k(-L_i) = L_i(-\frac{q}{u_f} + k) = 0 \quad (\text{D.6})$$

Bijgevolg bedraagt het aantal voertuigen dat gedurende Δt door link i t.g.v. de beperking door de opwaartse randvoorwaarde (die zich naar afwaarts heeft voortgeplant) op deze link maximaal kan gezonden worden:

$$S_{i,rand}(t) = N(x_i^L, t + \Delta t) - N(x_i^L, t) = N(x_i^0, t + \Delta t - \frac{L_i}{u_f}) - N(x_i^L, t) \quad (\text{D.7})$$

Vergelijkingen (D.6) en (D.7) drukken uit dat het cumulatief aantal voertuigen aan het afwaartse uiteinde x_i^L nooit groter kan zijn dan het cumulatief aantal voertuigen aan het opwaartse uiteinde x_i^0 $\frac{L_i}{u_f}$ tijdseenheden vroeger.

De sending flow is daarenboven eveneens beperkt door de eigenschappen van de link zelf. Het maximaal aantal voertuigen dat ink i kan verlaten tijdens Δt wordt immers bepaald door de capaciteit q_c :

$$S_{i,link}(t) = q_c \Delta t \quad (\text{D.8})$$

De sending flow van link i wordt bepaald door de meest beperkende van de twee voorgaande voorwaarden:

$$S_i(t) = \min(S_{i,rand}(t), S_{i,link}(t)) \quad (\text{D.9})$$

D.2.3 Receiving flows

De *receiving flow* van link i op tijdstip t is gedefinieerd als de instroom in deze link tussen tijdstippen t en $t + \Delta t$ in het geval van een oneindige verkeersvraag aan het opwaartse uiteinde x_i^0 . De receiving flow is echter beperkt door de afwaartse randvoorwaarden: verkeerstoestanden in congestie aan het afwaartse uiteinde x_i^L bereiken $\frac{L_i}{w}$ tijdseenheden later het opwaartse uiteinde x_i^0 aangezien zulke verkeerstoestanden zich voortbewegen met een negatieve, d.w.z. gericht tegen de verkeersstroom in, golfsnelheid w . Het verschil tussen de cumulatieve functies in deze twee punten op de vermelde tijdstippen is gelijk aan $L_i k_j$, het maximum aantal voertuigen dat op de link kan worden ‘gestockeerd’ (gebruik (D.5) met $k > k_c$ en q beiden constant):

$$N(x_i^0, t + \Delta t) - N(x_i^L, t + \Delta t + \frac{L_i}{w}) = q(-\frac{L_i}{w}) - k(-L_i) = L_i(-\frac{q}{w} + k) = L_i k_j \quad (\text{D.10})$$

Bijgevolg bedraagt het aantal voertuigen dat gedurende Δt door link i t.g.v. de beperking door de afwaartse randvoorwaarde (die zich naar opwaarts heeft voortgeplant) door deze link maximaal kan worden ontvangen:

$$R_{i,rand}(t) = N(x_i^0, t + \Delta t) - N(x_i^0, t) = N(x_i^L, t + \Delta t + \frac{L_i}{w}) + L_i k_j - N(x_i^0, t) \quad (\text{D.11})$$

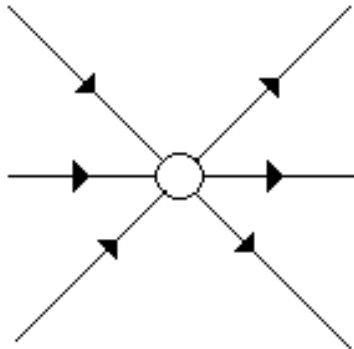
Vergelijkingen (D.10) en (D.11) drukken uit dat het cumulatief aantal voertuigen aan het opwaartse uiteinde x_i^0 nooit groter kan zijn dan het cumulatief aantal voertuigen aan het afwaartse uiteinde x_i^L $\frac{L_i}{w}$ tijdseenheden vroeger.

De receiving flow is daarenboven eveneens beperkt door de eigenschappen van de link zelf. Het maximaal aantal voertuigen dat link i kan oprijden gedurende Δt wordt immers bepaald door de capaciteit q_c :

$$R_{i,link}(t) = q_c \Delta t \quad (\text{D.12})$$

De receiving flow van link i wordt bepaald door de meest beperkende van de twee voorgaande voorwaarden:

$$R_i(t) = \min(R_{i,rand}(t), R_{i,link}(t)) \quad (\text{D.13})$$



Figuur D.2: Algemene knoop

D.2.4 Knoopmodellen

Een knoopmodel bepaalt welk gedeelte van de sending en receiving flows werkelijk kunnen gezonden/ontvangen worden. Daartoe voldoet het steeds aan het behoud van voertuigen. Deze knoopmodellen transfereren eigenlijk de voertuigen van opwaartse (sending) naar afwaartse (receiving) links en actualiseren tegelijkertijd de waarde van de cumulatieve functies aan de uiteinden van de links verbonden met desbetreffende knoop. Indien de receiving flows van de afwaartse links te klein zijn in vergelijking met de sending flows van de opwaartse links, kunnen niet alle voertuigen door de knoop. De beschikbare capaciteit wordt dan *demand proportional* verdeeld, d.w.z. evenredig met de vraag op elke link.

Een algemene knoop wordt voorgesteld in figuur D.2. Het zou ons te ver leiden de procedure volledig te beschrijven. Voor meer informatie wordt verwezen naar Tampère (2005).

Bijlage E

Optimalisatie van contraflow

E.1 Bepaling van de te onderzoeken alternatieven

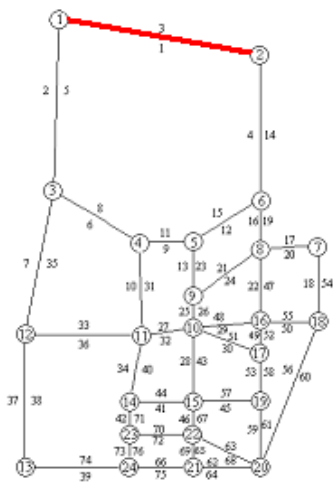
Zoals reeds gezegd in paragraaf 6.2.1 is het onmogelijk alle mogelijke combinaties van al dan niet omgedraaide links te beschouwen. Daarom worden hier een beperkt aantal alternatieve contraflowplannen voorgesteld, die allen geëvalueerd werden m.b.v. het LTM.

Het is de bedoeling deze verschillende alternatieven te selecteren zodanig dat de bijna 2^{76} niet-beschouwde alternatieven geen verdere verbetering van de verkeersafwikkeling kunnen betekenen. De 17 beschouwde alternatieven zijn weergegeven in figuren E.1 en E.2. Alternatief 0 is de situatie waarbij geen contraflow wordt toegepast en is dus de referentiesituatie waarmee de verschillende alternatieven dienen vergeleken te worden.

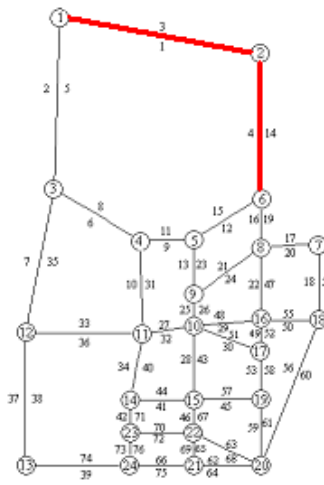
E.1.1 Alternatieven 1 t.e.m. 13

Vertrekpunt voor de selectie is de snelste route-boom van figuur 6.3. In een eerste fase (alternatieven 1 t.e.m. 13) wordt voor elke tak uit deze snelste route-boom afzonderlijk een aantal mogelijkheden weerhouden. De eerste mogelijkheid is het verdubbelen van de capaciteit (door de aanliggende link om te draaien) van de meest afwaartse link op deze tak. De tweede mogelijkheid is het verdubbelen van de capaciteit van de twee meest afwaartse links, enz. We voorzien echter niet evenveel mogelijkheden als dat er links zijn op een tak. Het omdraaien van de meest opwaartse links heeft immers geen zin aangezien de vraag per tijdseenheid (die maximaal 500 vtg/u bedraagt, zie figuur 6.2) aanzienlijk kleiner is dan de capaciteit van een link (minimaal 1 800 vtg/u).

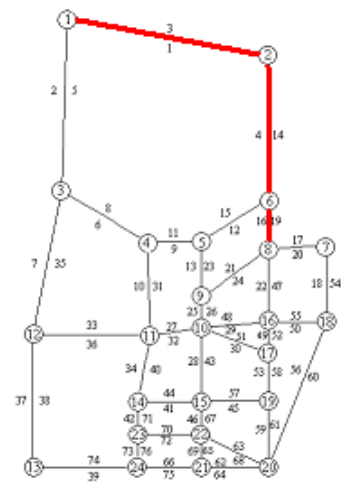
Dezelfde reden ligt aan de basis van het feit dat de verschillende mogelijkheden opgebouwd worden vanuit knoop 1: daar zullen sowieso de grootste intensiteiten optreden. Het is duidelijk dat het geen zin heeft bijvoorbeeld link 7 om te draaien, wanneer link 2 niet wordt omgedraaid. Daarenboven leidt het wel omdraaien van een bepaalde link en het niet omdraaien van de daaropvolgende afwaartse link tot praktische problemen. Wordt bijvoorbeeld



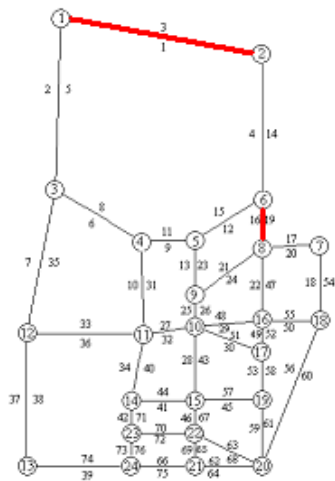
ALT. 1



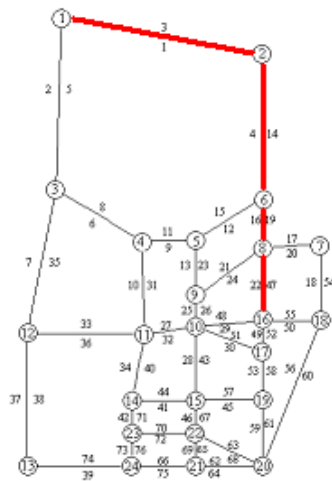
ALT. 2



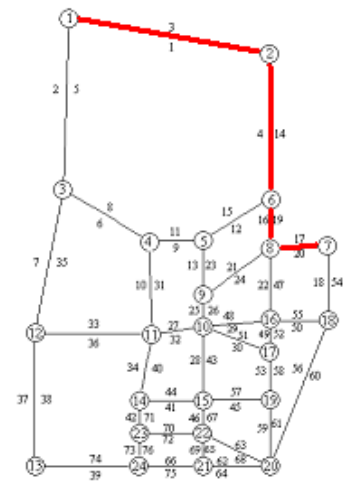
ALT. 3



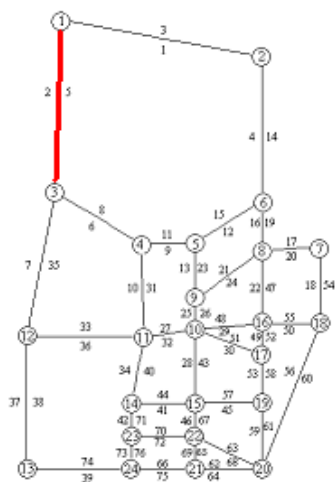
ALT. 3 BIS



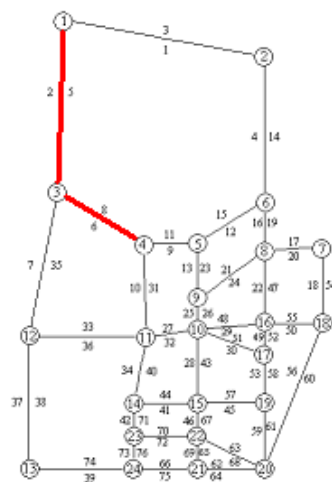
ALT. 4



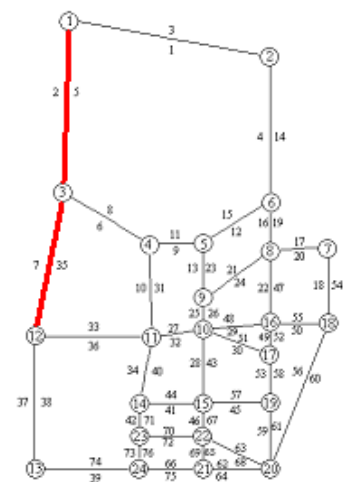
ALT. 5



ALT. 6

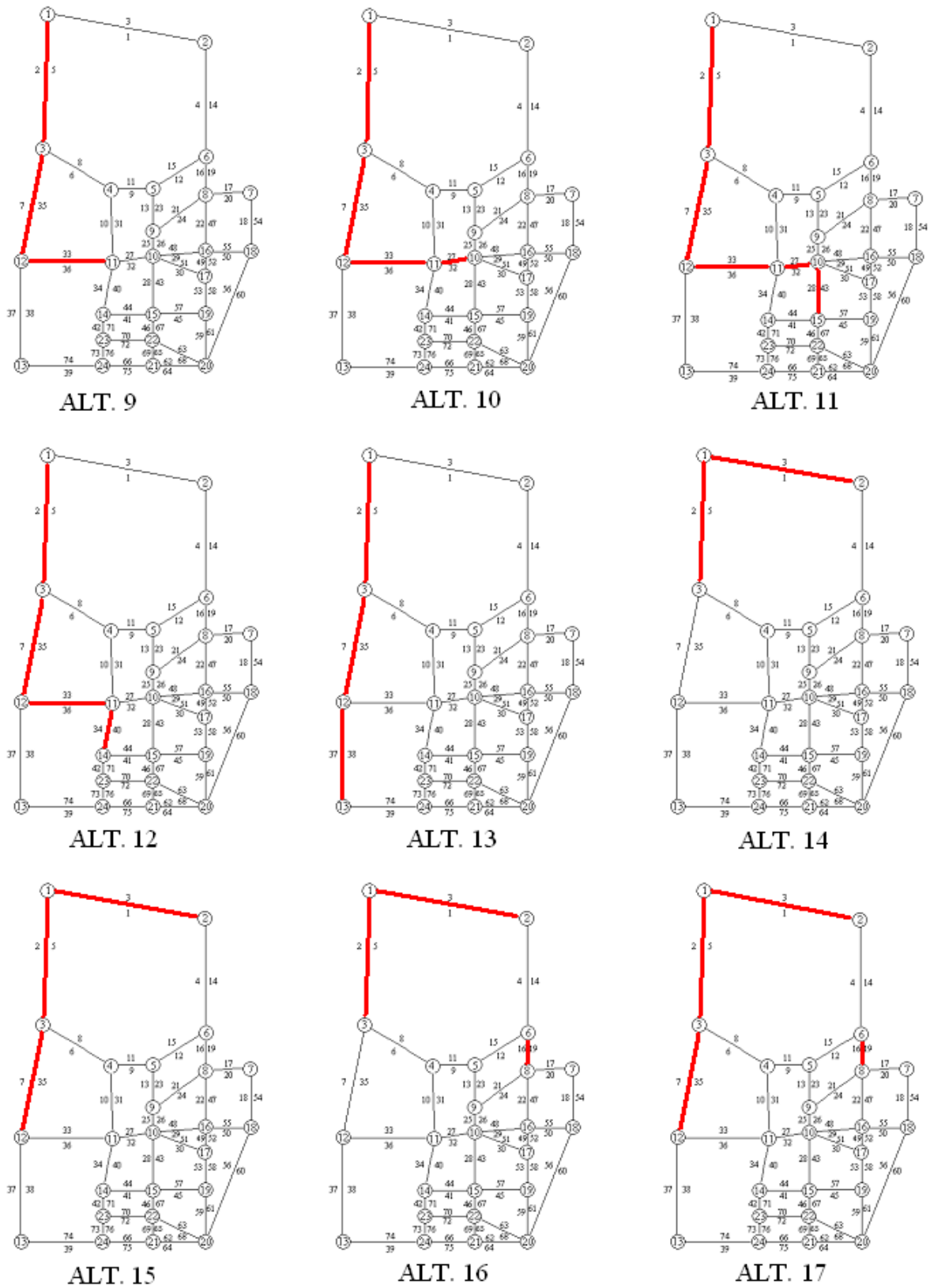


ALT. 7



ALT. 8

Figuur E.1: Alternatieven 1 t.e.m. 8 (inclusief 3bis)



Figuur E.2: Alternatieven 9 t.e.m. 17

Tabel E.1: Individuele evacuatie tijden [u] voor de alternatieven 0 t.e.m. 13

alternatief	2	9	13	19	20	21	23	24	μ	σ
0	9,20	9,16	11,89	11,00	10,51	11,00	11,66	9,55	10,50	1,01
1	9,09	9,16	11,89	10,97	10,47	11,00	11,66	9,55	10,47	1,03
2	9,09	9,16	11,89	10,97	10,47	11,00	11,66	9,55	10,47	1,03
3	9,09	9,16	11,89	9,24	9,24	11,00	11,66	9,55	10,10	1,12
4	9,09	9,16	11,89	9,24	9,24	11,00	11,66	9,55	10,10	1,12
5	9,09	9,16	11,89	9,24	9,24	11,00	11,66	9,55	10,10	1,12
6	9,20	9,16	10,24	11,00	10,51	10,01	10,08	9,51	9,96	0,60
7	9,20	9,16	10,24	11,00	10,51	10,01	10,08	9,51	9,96	0,60
8	9,20	9,16	9,16	11,00	10,51	9,20	9,20	9,16	9,58	0,69
9	9,20	9,16	9,16	11,00	10,51	9,20	9,20	9,16	9,58	0,69
10	9,20	9,16	9,16	11,00	10,51	9,20	9,20	9,16	9,58	0,69
11	9,20	9,16	9,16	11,00	10,51	9,20	9,20	9,16	9,58	0,69
12	9,20	9,16	9,16	11,00	10,51	9,20	9,20	9,16	9,58	0,69
13	9,20	9,16	9,16	11,00	10,51	9,20	9,20	9,16	9,58	0,69

link 4 wel omgedraaid, maar link 1 niet, dan zijn op de aanliggende links 4 en 14 in totaal vier uitwaarts gerichte rijstroken, terwijl er op link 3 slechts drie uitwaarts gerichte rijstroken beschikbaar zijn.

Dankzij het stapsgewijs uitbreiden van contraflow van afwaarts naar opwaarts op de verschillende takken, kan afgeleid worden wat het nut is van het omdraaien van een extra link. Door bijvoorbeeld de resultaten van alternatief 7 te vergelijken met deze van alternatief 6, kan geconcludeerd worden dat het omdraaien van link 6, hetgeen alternatief 7 van alternatief 6 onderscheidt, geen enkel effect heeft.

Resultaten LTM

In tabel E.1 worden de resultaten van het LTM voor de knopen 2, 9, 13, 19, 20, 21, 23 en 24 weergegeven. Daarnaast worden ook het gemiddelde μ en de standaarddeviatie σ van deze waarden aangegeven. Waarom deze worden beschouwd ter beoordeling van de verschillende alternatieven, wordt besproken in paragraaf 6.4.

Uit deze resultaten en meer bepaald uit het gemiddelde σ voor de verschillende alternatieven kan onmiddellijk afgeleid worden dat:

- **Alternatief 2** geen verbetering geeft t.o.v. alternatief 1: het omdraaien van link 4 heeft geen nut. Echter, **alternatief 3** leidt wel tot een reductie in evacuatie tijd. Dit wordt in de volgende paragraaf verder onderzocht.

Tabel E.2: Vergelijking tussen maximale vraag en capaciteit voor een aantal links

link	maximale vraag V_{max} [vtg/u]	capaciteit C [vtg/u]	V_{max}/C []
3	7500	5400	1,39
5	10000	5400	1,85
8	1500	1800	0,83
14	4000	3600	1,11
17	1500	1800	0,83
19	3500	1800	1,94
33	3500	3600	0,97
35	8000	5400	1,48
38	4000	5400	0,74
47	1500	1800	0,83

- **Alternatieven 4 en 5** geen verbetering geven t.o.v. alternatief 3: het omdraaien van links 22 en 20 heeft geen nut.
- **Alternatief 7** geen verbetering geeft t.o.v. alternatief 6: het omdraaien van link 6 heeft geen nut.
- **Alternatieven 9, 10, 11, 12 en 13** geen verbetering geven t.o.v. alternatief 8: het omdraaien van links 36, 32, 28, 34 en 37 heeft geen nut.

Met deze bevindingen wordt verder rekening gehouden bij het opstellen van een aantal bijkomende alternatieven.

Dat enkel het verdubbelen van de capaciteit van de links 3, 19, 5 en 35 een verbetering oplevert van de evacuatie, kan geverifieerd worden aan de hand van tabel E.2 waar voor de meest afwaartse links de maximale uurlijkse vraag op die link wordt vergeleken met de capaciteit. De maximale uurlijkse vraag is gelijk aan het aantal knopen opwaarts van deze link (in de snelste route-boom) vermenigvuldigd met 500 vtg/u. Indien deze maximale uurlijkse vraag groter is dan de capaciteit, zal het verhogen van de capaciteit inderdaad een verbetering opleveren. In het andere geval is geen verbetering meer mogelijk. Het is duidelijk dat tabel E.2 ook dienst had kunnen doen als vertrekpunt voor het opstellen van de te onderzoeken alternatieven.

E.1.2 Alternatieven 3bis en 14 t.e.m. 17

In een tweede fase (alternatieven 14 t.e.m. 17) worden vervolgens een aantal mogelijkheden gecombineerd, zodat links worden omgedraaid op verschillende takken van de snelste route-boom. Maar eerst wordt verder ingegaan op het ‘probleem’ van alternatieven 2 en 3.

Alternatief 3bis

Zoals in vorige paragraaf aangegeven levert alternatief 2 geen verbetering op t.o.v. alternatief 1, terwijl alternatief 3 dit wel doet. Dit duidt erop dat de bottleneck zich bevindt op link 19 (met een capaciteit van 1 800 vtg/u) en niet op link 14 (capaciteit van 3 600 vtg/u). Daarom wordt een extra mogelijk contraflowplan beschouwd, meer bepaald alternatief 3bis. Dit is dezelfde combinatie als deze van alternatief 3, echter zonder dat link 4 omgedraaid wordt.

Uit de resultaten van het LTM (zie verder in tabel E.3) blijkt dat alternatief 3 en 3bis tot exact dezelfde evacuatie tijden leiden. Hieruit kan besloten worden dat het omdraaien van link 4 overbodig is. Alternatief 3bis zal dus boven alternatief 3 verkozen worden, aangezien dan de nutteloze kost van het omdraaien van link 4 vermeden wordt.

Op het eerste zicht lijkt dit tegenstrijdig met het feit dat in tabel E.2 voor link 3 de verhouding tussen de maximale vraag en de capaciteit groter is dan 1. Dat het LTM toch geen verschil aangeeft, is enkel te wijten aan de keuze van de beschouwde beoordelingsparameters. Daar de verhouding relatief dicht bij 1 ligt, zal de congestie kunnen afnemen vanaf $t = 6$ u, het ogenblik vanaf wanneer de uurlijkse vraag afneemt (zie figuur 6.2). Hierdoor zal het 2500e voertuig, dat de evacuatie tijd van knoop 19 bepaalt, geen vertragingen meer oplopen.

Uit praktisch oogpunt levert dit alternatief geen bezwaren, ook al komen de voertuigen uit bv. knoop 8 terecht in een situatie waar eerst wel (link 19), vervolgens geen (link 14) en tenslotte opnieuw wel (link 3) contraflow wordt toegepast. Contraflow op link 19 leidt ertoe dat twee (i.p.v. één) rijstroken uitwaarts gericht zijn. En zelfs wanneer geen contraflow wordt toegepast op link 14, zoals in alternatief 3bis, zijn ook daar twee rijstroken beschikbaar voor het evacuerende verkeer.

Alternatieven 14 t.e.m. 17

Totnogtoe werden enkel alternatieven bestudeerd waarbij contraflow slechts op één snelste route afzonderlijk werd toegepast. Uiteraard dienen ook alternatieven bestudeerd waarbij contraflow wordt toegepast op meerdere snelste routes. Niet alle mogelijke combinaties worden echter bekeken. Op basis van de resultaten van de alternatieven 1 t.e.m. 13 werd namelijk duidelijk dat het omdraaien van bepaalde afwaartse links tot geen verdere verbetering van de verkeersafwikkeling leidt.

Het heeft dan ook weinig zin combinaties te bekijken met dergelijke alternatieven, meer bepaald alternatieven 2, 4, 5, 7 en 9 t.e.m. 13. Daarenboven wordt, zoals in vorige subparagraaf behandeld, alternatief 3bis verkozen boven alternatief 3. Door paarsgewijze combinatie van enerzijds de alternatieven 1 en 3bis met anderzijds de alternatieven 6 en 8 vindt men de alternatieven 14 t.e.m. 17, zoals geschetst in figuur E.2.

Tabel E.3: Individuele evacuatielijden [u] voor alternatieven 3bis en 14 t.e.m. 17

alternatief	2	9	13	19	20	21	23	24	μ	σ
3bis	9,09	9,16	11,89	9,24	9,24	11,00	11,66	9,55	10,10	1,12
14	9,09	9,16	10,24	10,97	10,47	10,01	10,08	9,51	9,94	0,61
15	9,09	9,16	9,16	10,97	10,47	9,20	9,20	9,16	9,55	0,68
16	9,09	9,16	10,24	9,24	9,24	10,01	10,08	9,51	9,57	0,44
17	9,09	9,16	9,16	9,24	9,24	9,20	9,20	9,16	9,18	0,05

Resultaten LTM

In tabel E.3 worden de individuele evacuatielijden uit knopen 2, 9, 13, 19, 20, 21, 23 en 24 weergegeven, net zoals het gemiddelde μ en de standaarddeviatie σ van deze waarden.

Vergelijking van de resultaten voor alternatief 17 met deze voor het geval waarbij enorm hoge capaciteiten werden toegekend aan alle links, laat toe te besluiten dat de evacuatie bij alternatief 17 volledig in free flow verloopt. Dat dit inderdaad het geval is blijkt uit tabel E.2: het verdubbelen van de capaciteit op links 3, 5, 19 en 35 leidt ertoe dat de maximale vraag nergens de capaciteit zal overschrijden. Behalve voor link 14 dan, maar daarvoor wordt verwezen naar de bespreking van alternatief 3bis hogerop in deze paragraaf.

E.2 Postprocessing

E.2.1 Classificatie van de alternatieven

In tabel E.4 worden de gegeneraliseerde tijdswinst, het aantal km aan omgedraaide links en de daaruit afgeleide waarde van de doelfunctie weergegeven voor de geteste alternatieven, gerangschikt volgens de waarde van de doelfunctie.

De gegeneraliseerde tijdswinst W wordt berekend zoals aangegeven in vergelijking (6.1) met $\alpha = 3$ en $\beta = \gamma = 1$. De doelfunctie Y wordt berekend aan de hand van vergelijking (6.2), waarbij $\delta = 0,0833$ u/km. K stelt het aantal km aan omgedraaide links voor.

E.2.2 Gevoeligheid van de oplossing voor keuze van α , β , γ en δ

In tabel E.5 worden voor een aantal combinaties van α , β , γ en δ de drie beste alternatieven gegeven, met daarbij telkens de waarde van de doelfunctie.

We merken op dat vanaf een waarde $\delta = 0,1666$ u/km de doelfunctie voor alle alternatieven een negatieve waarde heeft aangezien de kosten groter worden ingeschat dan de opbrengst (de gegeneraliseerde tijdswinst). De eerste keuze zal in deze gevallen dan ook vallen op het alternatief 0 (nergens contraflow).

Tabel E.4: Classificatie van de alternatieven ($\alpha = 3$, $\beta = \gamma = 1$, $\delta = 0,0833$ u/km)

alternatief	W	K	Y
17	2,04	15,24	0,77
16	1,29	11,31	0,35
6	0,72	4,62	0,33
7	0,72	7,19	0,12
8	0,78	8,55	0,06
0	0,00	0,00	0,00
14	0,74	9,99	-0,09
9	0,78	11,63	-0,19
13	0,78	12,07	-0,23
10	0,78	12,97	-0,30
12	0,78	13,42	-0,34
15	0,81	13,92	-0,35
1	0,00	5,37	-0,45
11	0,78	14,95	-0,47
3bis	0,06	6,69	-0,50
2	0,00	9,22	-0,77
3	0,06	10,54	-0,82
5	0,06	12,08	-0,95
4	0,06	12,52	-0,99

Tabel E.5: Gevoeligheid van de oplossing voor keuze van α , β , γ en δ

α	β	γ	δ	1e keuze	Y	2e keuze	Y	3e keuze	Y
1	1	1	0,0400	17	1,03	16	0,60	6	0,42
3	1	1	0,0400	17	1,43	16	0,84	6	0,53
5	1	1	0,0400	17	1,61	16	0,94	6	0,58
1	1	1	0,0833	17	0,37	6	0,22	16	0,11
3	1	1	0,0833	17	0,77	16	0,35	6	0,33
3	1	2	0,0833	17	0,59	6	0,28	16	0,23
3	2	1	0,0833	17	0,65	6	0,30	16	0,29
5	1	1	0,0833	17	0,95	16	0,45	6	0,38
1	1	1	0,1666	0	0,00	6	-0,16	7	-0,59
3	1	1	0,1666	0	0,00	6	-0,05	7	-0,48
5	1	1	0,1666	0	0,00	6	-0,01	17	-0,32

Voor alle andere onderzochte combinaties van α , β , γ en δ blijkt alternatief 17 veruit de meest gunstige kosten-batenverhouding te hebben. De tweede en derde keuze valt nagenoeg steeds op respectievelijk alternatief 16 en 6.

In deze case blijkt de gevoeligheid van de oplossing voor de keuze van α , β , γ en δ relatief klein. Er kan echter niet uitgesloten worden dat dit in andere situaties evenzeer het geval zal zijn. Deze gevoeligheid wordt immers vooral bepaald door de waarden van T , μ , σ en K voor de verschillende alternatieven. In deze case was het verschil in T , μ en σ tussen alternatief 17 en alternatief 16 zo groot (zie tabel E.3) dat alternatief 17 steeds boven alternatief 16 wordt verkozen, ongeacht de keuze van de parameters α , β , γ en δ .

Bibliografie

- Y. Aarts (2004). Medewerkster vakgroep verkeer bij de stad Eindhoven. Persoonlijke mail van 24/10.
- R. Alsnih & P. R. Stopher (2004). A review of the procedures associated with devising emergency evacuation plans. TRB Annual Meeting CD-ROM 2004.
- H. Balthazar (2001). *Praktische handleiding rampenmanagement*. Provincie Oost-Vlaanderen. Te downloaden van http://www.oost-vlaanderen.be/veiligheid/content.cfm?doc_id=48.
- B. Barrett, B. Ran & R. Pillai (2000). Developing a dynamic traffic management modeling framework for hurricane evacuation. TRB 79th Annual Meeting.
- D. H. Baxter (2001). Utilization of Florida's existing and future Intelligent transportation systems for enhancing statewide transportation system management during and after hurricane evacuations. 2001 ITS America 11th Annual Meeting and Exposition.
- B. Bens (2004). Hoofdinspecteur politiezone Beringen-Ham-Tessenderlo. Persoonlijke mail van 29/10.
- X. Chen (2003). Agent-based simulation of evacuation strategies under different road network structures. Te downloaden van <http://www.ucgis.org/summer03/studentpapers/xuweichen.pdf>.
- R. L. Church & R. M. Sexton (2002). Modeling small area evacuation: can existing transportation infrastructure impede public safety? Te downloaden van <http://www.ncgia.ucsb.edu/vital/research/pubs/200204-Evacuation.pdf>.
- T. J. Cova & J. P. Johnson (2002). Microsimulation of neighborhood evacuations in the urban-wildland interface. *Environment and Planning A*, 34:2211–2229. Te downloaden van <http://www.geog.utah.edu/~cova/cova-johnson-epa.pdf>.
- T. J. Cova & J. P. Johnson (2003). A network flow model for lane-based evacuation routing. *Transportation Research Part A*, 37:579–604. Te downloaden van <http://www.geog.utah.edu/~cova/cova-johnson-2003.pdf>.

- C. F. Daganzo (1995). The Cell Transmission Model. Part II: Network traffic. *Transportation Research Part B*, 29B(2):79–93.
- G. Davis & K. Sanderson (2001). Building our way out of congestion? Highway capacity for Twin Cities. Final Report Minnesota Department of Transportation, te downloaden van <http://www.lrrb.gen.mn.us/pdf/200201.pdf>.
- G. De Ceuster (2003). Incident management op autosnelwegen in België. Transport & Mobility Leuven, rapportnummer 01.28. Te downloaden van http://www.tmlleuven.be/verkeer/rapport_01.28_IncidentManagement.pdf.
- M. Dewil & B. Laurent (2004). *Invoering van Incident Management op het Vlaamse wegennet*. Master's thesis, Katholieke Universiteit Leuven. Te downloaden van <http://www.kuleuven.be/traffic/nl/eindwerken.php>.
- Federale Overheidsdienst Binnenlandse Zaken (2004). Ontwerp van Koninklijk Besluit betreffende de rampenplannen voor hulpverlening, in het bijzonder op gemeentelijk niveau.
- Federale Overheidsdienst Binnenlandse Zaken (2005). <http://www.seveso.be>.
- FEMA (2001). Mississippi hurricane evacuation study: transportation analysis. Te downloaden van http://chps.sam.usace.army.mil/USHESdata/Mississippi/MS_PDFs/MS%20Trans%portation%20Report.pdf.
- O. Franzese (2002). Oak Ridge Evacuation Modeling System (OREMS). Te downloaden van http://cta.ornl.gov/cta/One_Pagers/OREMS.pdf.
- O. Franzese & J. Sorensen (2003). Fast deployable system for consequence management: the emergency evacuation component. Te downloaden van <http://www.ornl.gov/~webworks/cppr/y2001/pres/120065.pdf>.
- O. Franzese & D. Xiong (2002). The value of remote sensing information in maintaining emergency evacuation plans. Te downloaden van http://riker.unm.edu/DASH_new/html/prod_whitepap.htm.
- H. Fu (2004). *Development of dynamic travel demand models for hurricane evacuation*. Dissertation, Louisiana State University. Te downloaden van <http://etd.lsu.edu/docs/available/etd-04092004-081738/>.
- H. Fu & C. G. Wilmot (2004). A sequential logit dynamic travel demand model for hurricane evacuation. TRB Annual Meeting CD-ROM 2004.
- M. Hertoghs & P. Rambach (1997). *Rampen op de grens*. Metro - Faculteit Rechtsgeleerdheid Universiteit Maastricht, Maastricht.

- A. G. Hobeika & C. Kim (1998). Comparison of traffic assignments in evacuation modeling. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 45(2):192–198.
- R. Hullett (1999). Application of ITS technology to hurricane evacuation routes. In *Compendium: Graduate student papers on advanced surface transportation systems, 1999*, pp. 231–263. Texas A&M University. Te downloaden van <http://swutc.tamu.edu/Reports/Compendiums/Compendium1999.pdf>.
- L. Immers & S. Logghe (2002). Verkeersstroomtheorie. Cursustekst H111, te downloaden van <http://www.kuleuven.be/traffic/stats/download.php?id=33>.
- L. Immers & J. Stada (1998). Verkeersmodellen. Cursustekst H111, te downloaden van <http://www.kuleuven.be/traffic/stats/download.php?id=31>.
- L. H. Immers, I. Yperman, J. E. Stada & A. Bleukx (2004). Reliability and robustness of transportation networks—problem survey and examples. In *proceedings of the Nectar, Cluster 1 meeting*. Amsterdam, Nederland.
- L. Janssen (2004). Beleidsmedewerker van het kabinet van de Commissaris van de Koningin van de provincie Limburg. Persoonlijke mail van 10/11.
- J. Kalfsbeek (2004). *Emergency planning: een planmatige aanpak voor het uitvoeren van evacuaties in Nederland*. Afstudeerwerk, TU Delft.
- G. Klunder (2005). Onderzoekster Verkeer en Vervoer bij TNO Ruimte en Infrastructuur. Persoonlijke gesprek van 04/02.
- D. C. Lewis (2001). September's great escape: new information system manages hurricane evacuations. *Roads and Bridges*, 39(9).
- M. Lighthill & J. Whitham (1955). On kinematic waves. I: Flow movement in long rivers. II: A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proc. Royal Soc.*, A229:281–345.
- Y. Y. Lim (2003). *Modeling and Evaluating Evacuation Contraflow Termination Point Designs*. Master's thesis, Louisiana State University. Te downloaden van <http://etd02.lnx390.lsu.edu/docs/available/etd-0701103-164735/>.
- L. G. Louis G. Neudorff, J. E. Randall, R. R. Reiss & R. Gordon (2003). Freeway management and operations handbook. Te downloaden van http://ops.fhwa.dot.gov/Travel/traffic/freeway_management.htm.
- B. Mei (2002). *Development of trip generation models of hurricane evacuation*. Master's thesis, Louisiana State University. Te downloaden van <http://etd02.lnx390.lsu.edu/docs/available/etd-0612102-192601/>.

- Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties Nederland (2003). Handboek voorbereiding rampenbestrijding. Te downloaden van <http://www.handboekrampenbestrijding.nl>.
- Ministerie van Buitenlandse Zaken Nederland (2005). http://www.minbuza.nl/default.asp?CMS_ITEM=MBZ456117.
- P. M. Murray & H. S. Mahmassani (2003). Model of household trip chain sequencing in an emergency evacuation. TRB Annual Meeting CD-ROM 2003.
- P. M. Murray-Tuite & H. S. Mahmassani (2004). Transportation network evacuation planning with household activity interactions. TRB Annual Meeting CD-ROM 2004.
- G. Newell (1993). A simplified theory of kinematic waves in highway traffic. Part I: General theory. Part II: Queuing at freeway bottlenecks. Part III: Multi-destination flows. *Transportation Research Part B*, 27B(4):281–314.
- Office of Management and Budget (2004). Analytical Perspectives, Budget of the United States Government, Fiscal Year 2005. Te downloaden van <http://www.whitehouse.gov/omb/budget/fy2005/pdf/spec.pdf>.
- A. Pal, A. J. Graettinger & T. Michael (2003). Emergency evacuation modeling based on geographical information system data. TRB Annual Meeting CD-ROM 2003.
- M. Palmer (2001). Using gis for emergency response: Evacuation traffic information system. Technical Paper 2001 ESRI User Conference.
- PBS&J (2000). Southeast United States hurricane study: Reverse lane standards and ITS strategies. Te downloaden van <http://216.205.76.112/Reports/its.htm>.
- PBS&J (2005). www.pbsj.com/what/Core/appdev/projects/EvacTrafficInfoModel.
- Provinciaal Instituut voor Brandweer en Ambulanciersopleiding (2005). <http://www.piba.be/elearning>. In te loggen als 'eguest' met als password 'eupdate'.
- Provincie Antwerpen (2002). Folder "Dit bord kan uw leven redden".
- A. E. Radwan, A. G. Hobeika & D. Sivasailam (1985). A computer simulation model for rural network evacuation under natural disasters. *ITE Journal*, 65(9):25–30.
- P. Richards (1956). Shockwaves on the highway. *Opns. Res.*, 4:42–51.
- A. Rietkerk (2004). Medewerker verkeerscoördinatiepunt provincie Noord-Holland. Persoonlijke mail van 29/10.

- P. Sattayhatewa & B. Ran (2000). Developing a dynamic traffic management model for nuclear power plant evacuation. TRB 79th Annual Meeting.
- J. Schmitt (2002). Sioux Falls, SD 2015: A growth management plan. In *American Planning Association National Planning Conference 2002 (Chicago) Proceedings*. Te downloaden van <http://www.asu.edu/caed/proceedings02/SCHMITT/schmitt.htm>.
- Sea Island Software (2004). <http://www.hurrevac.com>.
- V. Sisiopiku, S. Jones, A. Sullivan & X. Tang (2004). Regional traffic simulation for emergency preparedness. UTCA Report 03226, te downloaden van http://utca.eng.ua.edu/projects/final_reports/03226fn1.pdf.
- A. Stoffels (2004). Interventievorslag broomtankwagen. Stad Antwerpen - Veiligheid - Brandweer.
- C. Tampère (2005). Node methods specification. Intern document (26/01/2005), K.U.Leuven, afdeling Verkeer en Infrastructuur.
- G. Theodoulou & B. Wolshon (2004). Modeling and analyses of freeway contraflow to improve future evacuations. TRB Annual Meeting CD-ROM 2004.
- S. Tufekci (1995). An integrated emergency management decision support system for hurricane emergencies. *Safety Science*, 20(9):39–48.
- H. Tuydes & A. Ziliaskopoulos (2004). Network re-design to optimize evacuation contraflow. TRB Annual Meeting CD-ROM 2004.
- S. Tweedie, J. Rowland, S. Walsh & R. Rhoten (1986). A methodology for estimating emergency evacuation times. *The Social Science Journal*, 23(2):189–204.
- Unie van Waterschappen (2005). <http://www.waterschappen.nl>.
- T. Urbanik II (2000). Evacuation time estimates for nuclear power plants. *Journal of Hazardous Materials*, 75:165–180.
- E. Urbina (2002). *State-of-the-practice review of hurricane evacuation plans and policies*. Master's thesis, Louisiana State University. Te downloaden van <http://etd02.lnx390.lsu.edu/docs/available/etd-0418102-140236/>.
- E. Urbina & B. Wolshon (2003). National review of hurricane evacuation plans and policies: a comparison and contrast of state practices. *Transportation Research Part A*, 37:257–275.
- US Department of Transportation (2003). Effects of catastrophic events on transportation system management and operations - Cross cutting study. Te downloaden van http://www.itsdocs.fhwa.dot.gov/JPODOCS/REPTS_TE/13780.html.

- US Department of Transportation (2004). Effects of catastrophic events on transportation system management and operations - august 2003 northeast blackout - great lakes region. Te downloaden van http://www.itsdocs.fhwa.dot.gov//JPODOCS/REPTS_TE//14021.htm.
- R. van Eeden (2004). Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties, directie Crisisbeheersing. Persoonlijke mail van 3/11.
- B. van Eijk (2004). Medewerker bureau conflict- en crisisbeheersing politie Rijnmond. Persoonlijke mail van 3/11.
- J. van Noortwijk & M. van Maarseveen (2002). Evacuatie bij dreigende overstromingen. Onderzoeksrapport van de Universiteit Twente en HKV Lijn in water i.o.v. Rijkswaterstaat.
- J. Vanderheyden (2004). Civieltechnische constructies: wegenbouw. Cursustekst KULeuven - Departement Burgerlijke Bouwkunde.
- H. Veldhoen (2004). Kabinetsmedewerker Commissaris van de Koninging provincie Gelderland. Persoonlijke mail van 29/10.
- B. Wholson & B. H. Meehan (2003). Emergency evacuation: Ensuring safe and efficient transportation out of endangered areas. *TR News*, 224:3–9.
- C. G. Wilmot & B. Mei (2003). Comparison of alternative trip generation models for hurricane evacuation. TRB Annual Meeting CD-ROM 2003.
- C. Windhouwer, G. Klunder & F. Sanders (2004). Decision Support System Emergency Planning, creating evacuation strategies in case of flooding. Onderzoeksrapport TNO Inro en ingenieursbureau Oranjewoud.
- I. Yperman, S. Logghe & L. H. Immers (2005). The Link Transmission Model: An efficient implementation of the kinematic wave theory in traffic networks (forthcoming).