

Auteursrechterlijke overeenkomst

Opdat de Universiteit Hasselt uw eindverhandeling wereldwijd kan reproduceren, vertalen en distribueren is uw akkoord voor deze overeenkomst noodzakelijk. Gelieve de tijd te nemen om deze overeenkomst door te nemen, de gevraagde informatie in te vullen (en de overeenkomst te ondertekenen en af te geven).

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling met

Titel: Ontwikkelen van analytische haalbaarheidsmodellen voor het multimodaal vervoer
Richting: 3de jaar handelsingenieur - major operationeel management en logistiek

Jaar: 2008

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Ik ga akkoord,

MERCKX, Yannick

Datum: 5.11.2008

Ontwikkelen van analytische haalbaarheidsmodellen voor het multimodaal vervoer

Yannick Merckx

promotor :
Prof.dr.ir Frans LEMEIRE

Voorwoord

Deze eindverhandeling vormt het sluitstuk van mijn opleiding tot Handelingenieur aan de Universiteit Hasselt. Gedurende de laatste twee jaren, heb ik er bewust voor gekozen om me te verdiepen in operationeel management en logistiek. Het waren voornamelijk de opleidingsonderdelen die met logistiek te maken hadden, die me van in het begin bijzonder interesseerden. Het is dan ook niet verwonderlijk dat ik expliciet gekozen heb voor een logistiek thema als onderwerp voor deze eindverhandeling.

Het is dan ook met veel voldoening dat ik gewerkt heb aan deze thesis. Echter zonder de hulp van een aantal personen was het mij niet gelukt om deze opdracht tot een goed eind te brengen. Vandaar dat ik hen hier wil bedanken.

Vooreerst gaat mijn bijzondere dank uit naar mijn promotor Prof. dr. Ir. F. Lemeire voor zijn enthousiasme, zijn deskundige begeleiding, raadgevingen en kritische standpunten. Zonder hem was deze eindverhandeling nooit mogelijk geweest.

Vervolgens wil ik mijn ouders, mijn vrienden en familie bedanken voor hun mateloze morele en financiële steun gedurende zowel de voorbije vijf jaar als tijdens de verwezenlijking van deze eindverhandeling. Bij hen kon ik steeds terecht voor goede raad, een kritisch oordeel en vooral voor een stimulerend en motiverend gesprek. Mede dankzij de steun van al deze mensen heb ik mijn opleiding tot een goed einde kunnen brengen.

Yannick Merckx
Hasselt, Mei 2008

Samenvatting

Transport speelt een uiterst belangrijke rol in onze Belgische economie. Vlaanderen, en vooral Limburg, worden meer en meer beschouwd als de logistieke 'gateway' van Europa. De reden hiervoor is tweeledig. Ten eerste ligt Vlaanderen centraal binnen Europa en in de 'Blue Banana'. Ten tweede beschikt Vlaanderen over een goede transportinfrastructuur, namelijk een der dichtste wegen- en binnenvaartnetwerk van Europa, de Antwerpse, Zeebrugse en Gentse havens, de luchthavens te Zaventem, Chaleroi en Oostende, etc. Het gevolg is dat Europa relatief makkelijk bediend kan worden vanuit Vlaanderen. Vandaar dat de Vlaamse logistieke regio gekenmerkt wordt door het hoogste aantal distributiecentra per vierkante kilometer in Europa. Gezien de populariteit van de Vlaamse regio in de logistieke sector, is het niet verwonderlijk dat het totale goederenvervoer binnen onze landsgrenzen de laatste decennia sterk is toegenomen. In Vlaanderen wordt voornamelijk gebruik gemaakt van het transport via de weg, het vrachtvervoer via het spoor en het binnenvaarttransport. Het is voornamelijk het wegtransport dat het grootste deel van het vervoer voor zijn rekening neemt. Het aandeel van het wegtransport in het totaal transport ligt in Vlaanderen maar liefst tussen de 75 tot 80 procent. Het gevolg is een spectaculaire stijging van het aantal getransporteerde tonkm over het wegennetwerk. In 1985 transporteerde het wegvervoer in België ongeveer 19 Gtonkm, in 2006 bedroeg dit cijfer 49,5 Gtonkm. Dit is maar liefst een stijging van 160 procent.

Een dergelijke snelle ontwikkeling van het aantal tonkm op de Belgische wegen heeft zonder twijfel de kwaliteit van het wegtransport in toenemende mate onder druk gezet. De gevolgen van deze explosieve groei zijn ons allen bekend. Zo denken wij ondermeer aan het steeds erger wordende probleem van verkeerscongestie, de nefaste impact van het wegvervoer op het milieu, de geluidsoverlast, het grote aantal ongevallen op de weg, de schade aan het wegdek en de slinkende energievoorraden. Ondanks deze nadelen zijn er een aantal redenen die de populariteit van het wegtransport kunnen verklaren, namelijk de bereikbaarheid, flexibiliteit en betrouwbaarheid.

Uiteraard heeft elke transportmodus zijn specifieke voor- en nadelen. Vandaar dat het combineren van verschillende transportmodi, wat we definiëren als multimodaal transport, een oplossing kan bieden voor de verwezenlijking van een gedeeltelijke modale verschuiving van het wegvervoer naar het spoor- en/of binnenvaartransport. Deze modale verschuiving is nodig indien we de nefaste gevolgen van de explosieve groei in de transportsector willen verminderen. Het multimodaal transport kan deze modale verschuiving mee helpen realiseren door het combineren van verschillende transportmodi. Hierdoor worden de specifieke nadelen die verbonden zijn aan een bepaalde modus, gereduceerd door de voordelen van de andere gebruikte transportmodus. Aldus wordt de combinatie van de twee of meerdere modi vanaf een bepaalde afstand aantrekkelijker dan het unimodaal wegtransport.

Hoewel het gebruik van gecombineerd transport op zich een eenvoudig en aantrekkelijk alternatief biedt, wordt de te nemen transportbeslissing in een organisatie er niet makkelijker op. Theoretisch gezien dient men de verschillende transportalternatieven af te wegen ten opzichte van elkaar en

III

rekening te houden met specifieke beperkingen. Het beste alternatief is dan de optimale oplossing. In de praktijk is het echter niet eenvoudig om de verschillende alternatieven te vergelijken met elkaar. Vandaar dat we in deze eindverhandeling geografische modellen ontwikkeld hebben die als doel hebben de beleidsnemer te ondersteunen in het nemen van de hierboven geschetste transportbeslissingen. Aangezien de modellen de verschillende transportalternatieven moeten afwegen ten opzichte van elkaar, was het noodzakelijk om eerst verschillende vergelijkingscriteria te ontwikkelen. In deze thesis maken we onderscheid tussen vier vergelijkingscriteria, namelijk het economisch, sociaal-economisch, ecologisch en energetisch criterium. Elk vergelijkingscriterium maakt gebruik van een andere set van beoordelingsparameters. Elk haalbaarheidsmodel maakt gebruik van één specifiek vergelijkingscriterium. In de hoofdstukken twee en drie hebben we deze vier vergelijkingscriteria ontwikkeld. In de hoofdstukken vier, vijf en zes hebben we de verschillende analytische haalbaarheidsmodellen ontwikkeld welke gebruik maken van de vergelijkingscriteria als inputparameters.

In *hoofdstuk twee* leiden we het economisch vergelijkingscriterium af. Dit criterium gaat, zoals de naam reeds doet vermoeden, op basis van de economische kosten elk alternatief afwegen. Deze methode kiest voor elke specifieke afstand het transportalternatief met de laagste economische kosten. Aangezien economische kosten op verschillende manieren kunnen geïnterpreteerd worden, definiëren we deze term als de totale logistieke kostprijs volgens de 'inventory-theoretic approach' van Baumol en Vinod. Deze benadering veronderstelt dat de vervoergebruiker bij de transportbeslissing zowel rekening houdt met de door hem gedragen totale economische kosten van het transport als de transportgerelateerde kosten van zijn klant of leverancier. Hoewel de interne transportkost van zowel het binnenvaart- als spoortransport aanzienlijk goedkoper is dan die van het wegtransport, wegen de hoge voorraad-, overslag-, voortransport- en natransportkosten zwaar door bij het multimodaal transport. Vandaar dat de breakeven afstand voor het multimodaal transport sterk beïnvloed wordt door de eventuele aan- of afwezigheid van het voor- of natransport en het niveau van de overslagkosten.

In het *derde hoofdstuk* werken we zowel het sociaal-economisch, ecologisch als het energetisch vergelijkingscriterium uit. We dienen hierbij te vermelden dat we in het derde hoofdstuk initieel spreken over externe kosten. Deze worden gedefinieerd als kosten die ontstaan wanneer de activiteiten of beslissingen van één bepaalde groep het welzijn en de welvaart van een andere groep (eventueel inclusief de eerste groep) beïnvloeden zonder hiervoor gecompenseerd te worden. We kunnen deze kosten opsplitsen in een ecologisch en een niet-ecologisch deel. Het ecologisch deel bevat alle externe milieukosten die veroorzaakt worden door het transport. Deze ecologische kosten zullen gebruikt worden bij het ecologisch vergelijkingscriterium. Voor elk transportalternatief berekent men de totale ecologische kost voor elke specifieke afstand. Het alternatief dat de laagste ecologische kosten heeft, wordt als ecologisch optimaal aanzien voor de specifieke afstand. Uit de literatuur blijkt dat voornamelijk het wegtransport ecologische externe effecten veroorzaakt, terwijl zowel het binnenvaart- als spoortransport veel minder belastend is voor onze ecologische omgeving.

IV

Het sociaal-economisch vergelijkingscriterium is gelijkaardig aan het economisch criterium. Het enige verschil tussen beide is dat het eerste zowel gebruik maakt van de totale logistieke kosten als de totale externe kosten. De totale sociale kost van een transportalternatief voor een specifieke afstand bedraagt de optelsom van de totale logistieke en externe kost voor die afstand. Deze methode kiest voor elke specifieke afstand het transportalternatief met de laagste sociaal-economische kosten. Indien een beleidsnemer bewust gebruik maakt van het sociaal-economisch vergelijkingscriterium, zal hij met andere woorden niet enkel rekening houden met de totale economische kosten die hij en zijn leverancier of klant draagt, maar ook rekening houden met de kosten die het transport veroorzaakt aan onvergoede derden. Door het internaliseren van deze externe kosten kan men de tekortkoming van de vrije markt tenietdoen. Met andere woorden, men kan door het toepassen van dit vergelijkingscriterium de sociaal-optimale transportwijze bekomen. Het internaliseren van externe kosten is een taak die de overheid dient te bewerkstelligen. Uit de literatuur blijkt dat de interne transportkost inclusief de externe kost voor het binnenvaart- en spoortransport aanzienlijk lager zijn dan die voor het wegtransport. Vandaar dat we verwachten dat de breakeven afstand van het multimodaal transport kleiner zal zijn bij ceteris paribus internalisering van de externe kosten.

Het laatst uitgewerkte vergelijkingscriterium is het energetische. Hierbij gaat men voor elke afstand en elk transportalternatief na hoeveel energie men nodig heeft om het traject af te leggen. De verschillende alternatieven worden met elkaar vergeleken, en de energievriendelijkste, namelijk diegene welke het minste energie verbruikt, wordt hier aangegeven. Naarmate de energieprijzen verder stijgen, zal het energetisch criterium steeds belangrijker worden. Zo voorspelde De Keyzer (2008) dat de kans reëel is dat de prijs van een vat ruwe olie binnen 10 jaar de kaap van 300 dollar overschrijdt.

Na de vier vergelijkingscriteria te hebben geconstrueerd, ontwikkelen we de verschillende geografische haalbaarheidsmodellen in de hoofdstukken vier, vijf en zes. Deze modellen zullen op basis van de verschillende vergelijkingscriteria de geografische haalbaarheidsgebieden weergeven voor elk transportalternatief. Het verschil tussen een vergelijkingscriterium en een geografisch haalbaarheidsmodel is dat de eerste enkel de voorkeur kan geven voor een alternatief in één punt terwijl de tweede de volledige voorkeursgebieden weergeeft van elk alternatief op een landkaart. We ontwikkelen drie verschillende typen modellen. Hoewel deze modellen substantieel verschillen van elkaar in rekenwijze en resultaten, kunnen ze alle drie op eenzelfde manier geïnterpreteerd worden. Het eenvoudigste model wordt ontwikkeld in het vierde hoofdstuk, het tweede model in hoofdstuk vijf en het laatste model in hoofdstuk zes. Aangezien elk model slechts gebruik kan maken van één vergelijkingscriterium, splitsen we elk van de drie modellen verder op in vier submodellen, namelijk één voor elk vergelijkingscriterium.

In het *vierde hoofdstuk* ontwikkelen we het eerste geografisch haalbaarheidsmodel. Dit model is in staat om een specifiek unimodaal transportalternatief te vergelijken met een specifiek multimodaal transportalternatief. Hierbij gaan we ervan uit dat een partij goederen dient getransporteerd te worden van een vertrekpunt A naar een specifiek eindpunt B. Het unimodaal transport gaat

rechtstreeks van A naar B, terwijl het multimodaal alternatief gebruik maakt van de overslagterminals T1 en T2. Er is dus in het laatste geval nood aan zowel voor- als natransport gaande van respectievelijk het beginpunt A naar de overslagterminal T1 en van de overslagterminal T2 naar het eindpunt B. Verder gaan we er vanuit dat de kost per tonkm van het natransport gelijk is aan de kost per tonkm van het unimodaal transport. Hoewel deze assumptie in de meeste gevallen niet realistisch is, bestaan er situaties waar de kost van het natransport en het unimodaal transport in tonkm nagenoeg gelijk zijn. Na heel wat wiskundige berekeningen en vereenvoudigingen, bekomen we een modelmatige formule die de grens weergeeft tussen de haalbaarheidsgebieden van het unimodaal en het multimodaal transport. Een haalbaarheidsgebied is een regio waarbinnen de eindbestemming moet liggen opdat het in overweging genomen transportalternatief het voordeligste is in termen van het model. Indien we deze formule uitplotten op de landkaart bekomen we een hyperbool. We noemen deze figuur de breakeven hyperbool die, zoals reeds gezegd, de grens weergeeft tussen de twee haalbaarheidsgebieden. Uiteraard zijn deze gebieden afhankelijk van de inputparameters. Om de gevoeligheid van deze gebieden na te gaan hebben we een uitgebreide sensitiviteitsanalyse uitgevoerd op alle inputparameters.

In het *vijfde hoofdstuk* ontwikkelen we het tweede geografisch haalbaarheidsmodel. Dit is gelijk aan het eerste model mits één uitzondering: de kost per tonkm van het natransport moet niet meer gelijk zijn aan de kost per tonkm van het unimodaal transport en zal hoger liggen. Door deze aanpassing zal dit model in de meeste gevallen realistischer zijn dan het eerste. Hoewel deze wijziging op het eerste zicht niet zo belangrijk lijkt, heeft het grote gevolgen bij de afleiding van het model en het construeren van de haalbaarheidsgebieden. Na uitgebreide wiskundige berekeningen en veel vereenvoudigingen, bekomen we een modelmatige formule die, net zoals het eerste model, de grens weergeeft tussen de haalbaarheidsgebieden van het unimodaal en het multimodaal transport. Het grote verschil met het eerste model is dat deze formule geen hyperbool maar wel een eivormige figuur weergeeft. Dit is fundamenteel verschillend, aangezien in het eerste model beide haalbaarheidsgebieden oneindig groot zijn en in het tweede model één haalbaarheidsgebied oneindig groot is en het andere slechts een beperkt gesloten gebied omvat. In de meeste gevallen zal het gesloten haalbaarheidsgebied overeenstemmen met het multimodaal transportalternatief. In een economische context is het bestaan van een gesloten haalbaarheidsgebied in plaats van een niet gesloten gebied realistischer en aannemelijker. Net zoals bij het eerste geval zullen de twee haalbaarheidsgebieden afhankelijk zijn van de inputparameters, vandaar dat we in het vijfde hoofdstuk ook een uitgebreide sensitiviteitsanalyse uitvoeren.

In het *zesde hoofdstuk* ontwikkelen we twee varianten van het tweede model en creëren we een derde type haalbaarheidsmodel. De twee varianten zijn gelijkaardig aan het tweede model, met als enige verschil de type transportalternatieven die vergeleken worden met elkaar. De twee modellen tot hertoe vergeleken steeds één type van unimodaal transport met één type van multimodaal transport. De twee varianten vergelijken twee vormen van multimodale transportalternatieven met elkaar. De eerste variant vergelijkt twee multimodale trajecten die beide gebruik maken van dezelfde hoofdtransport modus. Een voorbeeld van een dergelijke situatie is wanneer men bij het gebruik van

VI

één specifieke hoofdtransport modus de keuze heeft uit twee mogelijke eindterminals om de eindbestemming te bereiken. De tweede variant vergelijkt twee verschillende typen van multimodale transportalternatieven die elk gebruik maken van een andere hoofdtransport modus. Een voorbeeld is de vergelijking tussen het multimodaal binnenvaarttransport en het multimodaal spoortransport.

Tot nu toe waren de geografische haalbaarheidsmodellen enkel in staat om twee transportalternatieven te vergelijken met elkaar. Uiteraard worden beleidsnemers meestal geconfronteerd met meerder transportalternatieven. Vandaar dat we een model ontwikkeld hebben dat in staat is om theoretisch een oneindig aantal transportalternatieven gelijktijdig te vergelijken met elkaar. Dit derde model bestaat uit het uitvoeren van meerder analyses gebaseerd op het tweede en/of eerste model waarna deze resultaten via transformaties omgevormd worden tot één globaal resultaat. In dit globaal resultaat kan men de haalbaarheidsgebieden van de verschillende transportalternatieven aflezen. De transformatieformules worden berekend op basis van draaiings- en verschuivingstransformaties. Dit laatste model aanzien we als het meest realistisch en flexibel model. Het is mogelijk om het even welk transportalternatief bijkomend te introduceren in dit model. Er is geen theoretische limiet van het aantal alternatieven dat men gelijktijdig kan vergelijken en men is volledig vrij bij de keuze van de verschillend typen transportalternatieven die men introduceert. We dienen echter wel op te merken dat naarmate het aantal te vergelijken alternatieven toeneemt, het concreet moeilijker wordt om de verschillende haalbaarheidsgebieden te interpreteren.

We hebben de haalbaarheidsgebieden van de geografische modellen steeds geïnterpreteerd als een regio waarbinnen de eindbestemming moet liggen opdat het in overweging genomen transportalternatief het voordeligste is in termen van het model. Indien echter de analyse uitgevoerd wordt op een mogelijk transport waarbij de eindbestemming nog niet concreet bestaat dan is het mogelijk om deze modellen te gebruiken om de optimale locatie te vinden. De beleidsnemer kan dan nagaan waar de eindbestemming moet liggen opdat hij optimaal gebruik kan maken van een door hem gespecificeerde transportmodus. De modellen kunnen ook gebruikt worden door overheids- of private instanties die als doel hebben bepaalde alternatieve transportwijzen te stimuleren. Met deze modellen kunnen zij nagaan welke transportalternatieven optimaal zijn bij bepaalde trajecten en welke acties zij kunnen ondernemen om een bepaalde transportwijze aantrekkelijker te maken. Zij kunnen namelijk op een iteratieve wijze nagaan wat de invloed is van hun acties op de haalbaarheidsgebieden en de uiteindelijk optimale transportwijze. Men zou ondermeer deze modellen kunnen gebruiken om de optimale locaties te bepalen van toekomstige overslagterminals in de binnenvaartsector.

Inhoudsopgave

Voorwoord	I
Samenvatting	II
Inhoudsopgave	VII
Lijst met algemene afkortingen	XI
Lijst van figuren	XII
Lijst met tabellen	XV
Hoofdstuk 1 : Probleemstelling goederentransport	- 1 -
1.1 : Situering van het praktijkprobleem	- 1 -
1.2 : Centrale onderzoeksvraag	- 5 -
1.3 : Deelvragen	- 6 -
1.4 : Nut van de analytische berekeningen	- 7 -
1.5 : Definiëring van enkele belangrijke begrippen	- 8 -
1.5.1 : Verkeer, transport en vervoer	- 8 -
1.5.2 : Multimodaliteit, intermodaliteit en gecombineerd vervoer	- 8 -
1.5.3 : Haalbaarheidsgebied	- 10 -
1.6 : Werkwijze	- 10 -
Hoofdstuk 2 : Analyse van de totale logistieke kostprijs	- 12 -
2.1 : Inleiding	- 12 -
2.2 : De transportkosten	- 13 -
2.2.1 : Tijd- en kilometerkosten	- 14 -
2.2.2 : Schaalvoordelen	- 15 -
2.3 : Kosten van goederenbehandeling	- 16 -
2.4 : Voorraadkosten	- 17 -
2.4.1 : Inleiding	- 17 -
2.4.2 : Verschillende types voorraden	- 18 -
2.4.3 : Interestkosten	- 21 -
2.4.4 : Verzekeringskosten	- 23 -
2.4.5 : Magazijnkosten	- 24 -
2.4.6 : Materiaalbehandelingskosten	- 24 -
2.4.7 : Ontwaardingkosten	- 25 -
2.5 : Kosten van voorraadtekort	- 26 -
2.6 : Verpakkingskosten	- 26 -
2.7 : Orderbehandeling- en administratiekosten	- 27 -
2.8 : Instelkosten	- 27 -
2.9 : Kosten van klantenservice	- 27 -
2.10 : kosten van vestigingsplaats	- 28 -

VIII

2.11 : Kostenanalyse voor de haalbaarheidsmodellen van het multimodaal vervoer.....	- 29 -
2.11.1 : kostenfunctie unimodaal vervoer.....	- 33 -
2.11.2 : kostenfunctie multimodaal vervoer.....	- 40 -
2.12 : Invloed van gemiddelde snelheid en gemiddelde vracht per levering op de totale logistieke kosten.	- 41 -
Hoofdstuk 3 : Externe kosten van het transport.....	- 46 -
3.1 : Inleiding.....	- 46 -
3.2 : Verschillende onderverdelingen van externe kosten	- 46 -
3.2.1 : Geldelijke (pecuniary) en technologische externaliteiten	- 47 -
3.2.2 : Vervuiling en congestie externaliteiten.....	- 47 -
3.3 : Transport en de omgeving : pure vervuilingkosten	- 48 -
3.3.1 : Algemeen.....	- 48 -
3.3.2 : Samenstellende onderdelen van de externe kosten	- 49 -
3.3.3 : Waarderingsmethoden voor externaliteiten	- 58 -
3.4 : Verkeer congestie : pure congestie	- 62 -
3.4.1 : Algemeen.....	- 62 -
3.4.2 : Economische kost van congestie	- 65 -
3.5 : Analyse voor het haalbaarheidsmodel van het multimodaal vervoer.....	- 68 -
3.5.1 : Inleiding	- 68 -
3.5.2 : Ecologische vergelijkingscriterium	- 68 -
3.5.3 : Sociaal-economisch vergelijkingscriterium.....	- 73 -
3.5.4 : Energetisch vergelijkingscriterium	- 76 -
Hoofdstuk 4 : Haalbaarheidsmodellen uitgaande van gelijke variabele kosten van het unimodaal transport en het multimodaal natransport.....	- 79 -
4.1 : Inleiding.....	- 79 -
4.2 : Afleiding algemeen haalbaarheidsmodel	- 80 -
4.3 : Economisch haalbaarheidsmodel met $C_{T2B} = C_{AB}$	- 88 -
4.4 : Sociaal-economisch haalbaarheidsmodel met $C_{T2B} = C_{AB}$	- 90 -
4.5 : Ecologisch haalbaarheidsmodel met $C_{T2B} = C_{AB}$	- 92 -
4.6 : Energetisch haalbaarheidsmodel met $C_{T2B} = C_{AB}$	- 94 -
4.7 : Vergelijken van de economische, sociaal-economische, ecologische en energetische modellen	- 95 -
4.8 : Sensitiviteitsanalyse van het algemeen haalbaarheidsmodel met $C_{T2B} = C_{AB}$	- 96 -
4.7.1 : Inleiding	- 96 -
4.7.2 : Geval 1 : Wijziging verhouding C_{AB} over C_{T1T2}	- 98 -
4.7.3 : Geval 2 : Een wijziging in de afstand van het voortransport (d_{AT1}).....	- 99 -
4.7.4 : Geval 3 : Een verandering in vaste kosten	- 100 -
4.7.5 : Geval 4 : Een wijziging van de gemiddelde snelheid van een specifieke modus	- 101 -
4.7.6 : Geval 5 : Integreeren van externe kosten.....	- 102 -

4.7.7 : Geval 6 : Een verandering in de procentuele bezettingsgraad van een vervoersmodus.....-

103 -

Hoofdstuk 5 : Haalbaarheidsmodellen uitgaande van niet gelijke variabele kosten van het unimodaal transport en het multimodaal natransport.....	- 105 -
5.1 : Inleiding.....	- 105 -
5.2 : Afleiding algemeen haalbaarheidsmodel	- 105 -
5.3 : Vergelijking $C_{T2B} \neq C_{AB}$ met $C_{T2B} = C_{AB}$	- 115 -
5.4 : Economisch haalbaarheidsmodel met $C_{T2B} \neq C_{AB}$	- 116 -
5.5 : Sociaal-economisch haalbaarheidsmodel met $C_{T2B} \neq C_{AB}$	- 118 -
5.6 : Ecologisch haalbaarheidsmodel met $C_{T2B} \neq C_{AB}$	- 119 -
5.7 : Energetisch haalbaarheidsmodel met $C_{T2B} \neq C_{AB}$	- 120 -
5.8 : Vergelijken van de economische, sociaal-economische, ecologische en energetische modellen	- 120 -
5.9 : Sensitiviteitsanalyse van het algemeen haalbaarheidsmodel met $C_{T2B} \neq C_{AB}$	- 122 -
5.9.1 : Inleiding	- 122 -
5.9.2 : Geval 1 : Wijziging verhouding C_{AB} over C_{T1T2}	- 123 -
5.9.3 : Geval 2 : Een wijziging in de afstand van het voortransport (d_{AT1}).....	- 124 -
5.9.4 : Geval 3 : Een verandering in vaste kosten	- 125 -
5.9.5 : Geval 4 : Een wijziging van de gemiddelde snelheid van een specifieke modus	- 126 -
5.9.6 : Geval 5 : Een verandering in de parameter β	- 127 -
5.9.7 : Geval 6 : integreren van externe kosten	- 128 -
5.9.8 : Geval 7 : Een wijziging in de procentuele bezettingsgraad van een vervoersmodus	- 129 -
Hoofdstuk 6 : Uitbreiding van de analytische haalbaarheidsmodellen.....	- 131 -
6.1 : Inleiding.....	- 131 -
6.2 : Directe vergelijking van twee alternatieven : uitbreiding combinaties type alternatieven	- 131 -
6.2.1 : Modelmatige analyse van de keuze van terminals bij het multimodaal transport	- 131 -
6.2.2 : Vergelijking twee verschillende types van multimodaal transport	- 137 -
6.3 : Simultane weergave van meer dan twee transportalternatieven	- 142 -
6.3.1 : Inleiding	- 142 -
6.3.2 : Algemeen.....	- 142 -
6.3.3 : Implementatie	- 147 -
6.4 : Directe vergelijking van drie alternatieven : uitbreiding combinaties type alternatieven.	- 149 -
6.4.1 : Modelmatige analyse van de keuze van terminals bij het multimodaal transport	- 149 -
6.4.2 : Vergelijking twee verschillende types van multimodaal transport	- 151 -
6.5 : Directe vergelijking van meer dan drie alternatieven.....	- 153 -
Hoofdstuk 7 : Uitgewerkt voorbeeld.....	- 154 -
7.1 : Inleiding.....	- 154 -
7.2 : Situatieschets	- 154 -

7.3 : Economisch model	- 158 -
7.3.1 : Unimodaal wegtransport vs multimodaal binnenvaarttraject	- 158 -
7.3.2 : Unimodaal wegtransport vs multimodaal spoortransport traject één	- 159 -
7.3.3 : Unimodaal wegtransport vs multimodaal spoortransport traject twee	- 160 -
7.3.4 : Multimodaal binnenvaarttransport vs multimodaal spoortransport traject één	- 161 -
7.3.5 : Multimodaal binnenvaarttransport vs multimodaal spoortransport traject twee	- 161 -
7.3.6 : Multimodaal spoortransport traject één vs spoortransport traject twee	- 162 -
7.3.7 : Totale vergelijking.....	- 162 -
7.4 : Sociaal-economisch model	- 165 -
7.4.1 : Unimodaal wegtransport vs multimodaal binnenvaarttraject	- 166 -
7.4.2 : Unimodaal wegtransport vs multimodaal spoortransport traject één	- 166 -
7.4.3 : Unimodaal wegtransport vs multimodaal spoortransport traject twee	- 166 -
7.4.4 : Multimodaal binnenvaarttransport vs multimodaal spoortransport traject één	- 167 -
7.4.5 : Multimodaal binnenvaarttransport vs multimodaal spoortransport traject twee	- 167 -
7.4.6 : Multimodaal spoortransport traject één vs spoortransport traject twee	- 167 -
7.4.7 : Totale vergelijking.....	- 167 -
7.5 : Ecologisch model	- 170 -
7.5.1 : Unimodaal wegtransport vs multimodaal binnenvaarttraject	- 170 -
7.5.2 : Unimodaal wegtransport vs multimodaal spoortransport traject één	- 171 -
7.5.3 : Unimodaal wegtransport vs multimodaal spoortransport traject twee	- 171 -
7.5.4 : Multimodaal binnenvaarttransport vs multimodaal spoortransport traject één	- 171 -
7.5.5 : Multimodaal binnenvaarttransport vs multimodaal spoortransport traject twee	- 171 -
7.5.6 : Multimodaal spoortransport traject één vs spoortransport traject twee	- 172 -
7.5.7 : Totale vergelijking.....	- 172 -
7.6 : Energetisch model	- 174 -
7.6.1 : Unimodaal wegtransport vs multimodaal binnenvaarttraject	- 175 -
7.6.2 : Unimodaal wegtransport vs multimodaal spoortransport traject één	- 175 -
7.6.3 : Unimodaal wegtransport vs multimodaal spoortransport traject twee	- 175 -
7.6.4 : Multimodaal binnenvaarttransport vs multimodaal spoortransport traject één	- 176 -
7.6.5 : Multimodaal binnenvaarttransport vs multimodaal spoortransport traject twee	- 176 -
7.6.6 : Multimodaal spoortransport traject één vs spoortransport traject twee	- 176 -
7.6.7 : Totale vergelijking.....	- 177 -
7.7 : Verdubbeling van de waarde van de te transporteren goederen.....	- 178 -
7.8 : Een 10% daling van de overslagkosten van multimodale binnenvaarttraject	- 181 -
7.9 : Internaliseren van 10% van de externe kosten	- 182 -
7.10 : Een 10% stijging van de gemiddelde snelheid van de binnenvaartmodus.....	- 184 -
Algemeen besluit	- 186 -
Lijst van de geraadpleegde werken.....	- 192 -
Bijlagen.....	- 195 -

Lijst met algemene afkortingen

De volgende algemene afkortingen worden gebruikt in het onderzoek:

- G = giga = miljard = 10^9
- M = mega = miljoen = 10^6
- k = kilo = duizend = 10^3
- μ = micro = 10^{-6}
- Mm = megameter = 1000 km
- tonkm = tonkilometer = is een eenheid die vaak in de transportgeografie en de transporteconomie gebruikt wordt. Eén tonkilometer is het vervoer van 1 ton over 1 kilometer.
- EUR = de officiële ISO-code van de euro munteenheid
- TLC = totale logistieke kosten uitgedrukt in euro
- J = joule = is in het SI de eenheid van energie
- cos = cosinus
- sin = sinus
- tan = tangens

Lijst van figuren

Figuur 1.1 : Voorstelling van de evolutie van het aantal getransporteerde tonkm over de Belgische wegen, op basis van cijfers van FEBIAC.....	- 1 -
Figuur 1.2 : Weergave van de relaties tussen de begrippen multimodaal, intermodaal en gecombineerd vervoer	- 9 -
Figuur 2.1 : Vergelijking overslag unimodaal met multimodaal transport	- 17 -
Figuur 2.2 : Weergave van het principe van cyclusvoorraad	- 19 -
Figuur 2.3 : Voorstelling van het korte- en langetermijn evenwicht van de modale verdeling van het transport voor een bepaald traject.....	- 31 -
Figuur 2.4 : Invloed van de gemiddelde hoeveelheid vracht per levering op de logistieke kost per ton	- 43 -
Figuur 2.5 : Invloed van de gemiddelde snelheid van een specifieke modus op de totale logistieke kost per ton.....	- 45 -
Figuur 3.1 : Optimale negatieve omgevingseffecten	- 49 -
Figuur 3.2 : weergave van de relatie percentage geïrriteerd met het geluidsniveau in dBA voor het wegtransport, luchtransport en spoortransport.....	- 50 -
Figuur 3.3 : Weergave van tijds- en ruimteverdeling van uitlaatgassen.....	- 52 -
Figuur 3.4 : Evolutie van CO, TSP, SO ₂ , NO _x , NMVOS en CO ₂ in de periode 1990-2006 in Vlaanderen	- 55 -
Figuur 3.5 : Weergave van de relatie welzijn en rijkdom van een individu	- 60 -
Figuur 3.6 : Weergave van de 'travel cost' methode	- 61 -
Figuur 3.7 : Weergave van de 'speed-flow' relatie	- 63 -
Figuur 3.8 : Weergave van de 'speed-flow' relatie en de vraag naar ruimte op de weg.....	- 64 -
Figuur 3.9 : Weergave van het maatschappelijk verlies (deadweight loss) veroorzaakt door een te hoog niveau van congestie	- 65 -
Figuur 3.10 : Energie-efficiënte van verschillende modi uitgedrukt per MJ/tonkm.....	- 78 -
Figuur 4.1 : Voorstelling van twee transportalternatieven	- 80 -
Figuur 4.2 : Voorstelling van beide vervoersalternatieven in het assenstelsel.....	- 82 -
Figuur 4.3 : Voorstelling van de breakeven hyperbool en asymptoten.....	- 87 -
Figuur 4.4 : Voorstelling van de haalbaarheidshyperbolen van het economisch, het sociaal-economisch, het energetisch en het ecologisch model	- 96 -
Figuur 4.5 : Wijziging breakeven hyperbool uitgaande een stijging van de variabele kostenverhouding	- 98 -
Figuur 4.6 : Wijziging van breakeven hyperbool uitgaande van een 50% stijging in de afstand van het voortransport.....	- 99 -
Figuur 4.7 : Wijziging van breakeven hyperbool ten gevolge van een 10% stijging van de overslagkosten van het multimodaal traject.....	- 101 -
Figuur 4.8 : Wijziging van de breakeven hyperbool uitgaande van een daling van de gemiddelde snelheid unimodaal transport.....	- 102 -

XIII

Figuur 4.9 : Wijziging van de breakeven hyperbool veroorzaakt door een 20% daling van de bezettingsgraad van de gebruikte binnenvaartmodus.....	- 103 -
Figuur 5.1 : Voorstelling van twee transportalternatieven	- 106 -
Figuur 5.2 : Voorstelling van beide vervoersalternatieven in het assenstel	- 108 -
Figuur 5.3 : Voorstelling van de breakeven eivormige figuur.	- 114 -
Figuur 5.4 : Voorstelling van zowel de breakeven hyperbool als de breakeven eivormige figuur -	- 115 -
Figuur 5.5 : Voorstelling van zowel de breakeven hyperbool als de breakeven eivormige figuur.-	- 116 -
Figuur 5.6 : Voorstelling van de breakeven eivormige figuren van het economisch, het sociaal-economisch, het energetisch en het ecologisch model	- 121 -
Figuur 5.7 : Wijziging van de breakeven eivormige figuur veroorzaakt door een stijging van de verhouding C_{AB} over C_{T2B}	- 124 -
Figuur 5.8 : Wijziging van de breakeven eivormige figuur veroorzaakt door een 50% stijging in de afstand van het voortransport.....	- 125 -
Figuur 5.9 : Wijziging van de breakeven eivormige figuur uitgaande van een daling van 10% in de overslagkosten.....	- 126 -
Figuur 5.10 : Wijziging van de breakeven eivormige figuur uitgaande van een daling van de gemiddelde snelheid unimodaal transport.....	- 127 -
Figuur 5.11 : Wijziging breakeven eivormige figuur.....	- 128 -
Figuur 5.12 : Wijziging breakeven eivormige figuur veroorzaakt door een 20% stijging in de bezettingsgraad van het gebruikte binnenvaartschip	- 129 -
Figuur 6.1 : Voorstelling van de keuze van terminals.....	- 132 -
Figuur 6.2 : Nieuwe voorstelling van de keuze van terminals.....	- 133 -
Figuur 6.3 : Voorstelling van breakeven hyperbool en asymptoten	- 136 -
Figuur 6.4 : Voorstelling van twee verschillende multimodale transportsystemen	- 138 -
Figuur 6.5 : Nieuwe voorstelling van twee verschillende multimodale transportsystemen	- 138 -
Figuur 6.6 : Voorstelling eivormig haalbaarheidgebied van het multimodaal type één (via terminal T2) ten opzichte van type twee (via terminal V2)	- 141 -
Figuur 6.7 : Draaitransformatie over een hoek van θ	- 143 -
Figuur 6.8 : Verschuivingstransformatie van de oorsprong naar $(\alpha;\beta)$	- 144 -
Figuur 6.9 : Draai- en verschuivingstransformatie met een hoek van θ en van de oorsprong naar $(\alpha;\beta)$	- 145 -
Figuur 6.10 : Oriëntering van de assenstelsels bij de vergelijking van drie alternatieven.....	- 149 -
Figuur 6.11 : Simultane vergelijking van drie transportalternatieven	- 150 -
Figuur 6.12 : Oriëntering van de assenstelsels bij de vergelijking van drie alternatieven.....	- 151 -
Figuur 6.13 : Simultane vergelijking van drie transportalternatieven	- 152 -
Figuur 7.1 : Vereenvoudigde weergave van de verschillende transportalternatieven	- 156 -
Figuur 7.2 : Voorstelling van de zes economische haalbaarheidscurven.....	- 163 -
Figuur 7.3 : Voorstelling van de zes economische haalbaarheidscurven en de daaruit volgende algemene haalbaarheidsgebieden voor de vier transportalternatieven	- 164 -
Figuur 7.4 : Voorstelling van de vier sociaal-economische haalbaarheidscurven	- 168 -

Figuur 7.5 : Voorstelling van de vier sociaal economische haalbaarheidscurven en de daaruit volgende algemene haalbaarheidsgebieden voor de vier transportalternatieven ...	- 169 -
Figuur 7.6 : Voorstelling van de vier ecologische haalbaarheidscurven.....	- 173 -
Figuur 7.7 : Voorstelling van de vier ecologische haalbaarheidscurven en de daaruit volgende algemene haalbaarheidsgebieden voor de vier transportalternatieven	- 174 -
Figuur 7.8 : Voorstelling van de vier energetische haalbaarheidscurven	- 177 -
Figuur 7.9 : Voorstelling van de vier energetische haalbaarheidscurven en de daaruit volgende algemene haalbaarheidsgebieden voor de vier transportalternatieven	- 178 -
Figuur 7.10 : Voorstelling van de algemene economische haalbaarheidsgebieden voor de vier transportalternatieven bij een verdubbeling van de waarde van de goederen	- 179 -
Figuur 7.11 : Voorstelling van de algemene sociaal-economische haalbaarheidsgebieden voor de vier transportalternatieven bij een verdubbeling van de waarde van de goederen	- 180 -
Figuur 7.12 : Voorstelling van de algemene economische haalbaarheidsgebieden voor de vier transportalternatieven bij een 10% daling van de overslagkosten van de binnenvaart	- 181 -
Figuur 7.13 : Voorstelling van de algemene economische haalbaarheidsgebieden voor de vier transportalternatieven bij een internalisering van 10% van de externe kosten	- 183 -
Figuur 7.14 : Voorstelling van de algemene economische haalbaarheidsgebieden voor de vier transportalternatieven bij een 10% stijging van de gemiddelde snelheid van de binnenvaartmodus.....	- 184 -

Lijst met tabellen

Tabel 1.1 : Evolutie van de uitstoot van CO ₂ door de verschillende sectoren	- 3 -
Tabel 2.1 : Gemiddelde prijs in EUR per tonMm voor verschillende modi in Nederland uitgedrukt in prijzen van 1990	- 15 -
Tabel 2.2 : Overzicht van de samenstellende delen van de voorraadkost	- 25 -
Tabel 2.3 : Samenvattende weergave van de logistieke kostenelementen.	- 28 -
Tabel 3.1 : Evolutie van voornaamste emissies in de periode 1990-2006 in Vlaanderen	- 55 -
Tabel 3.2 : Evolutie van het aantal verkeersslachtoffers in België in periode 2003-2006	- 57 -
Tabel 3.3 : Kosten luchtvervuiling uitgedrukt euro per ton	- 70 -
Tabel 3.4 : Luchtvervuilingkosten van vrachtwagens, exclusief CO ₂ en CO, uitgedrukt in prijzen 2000 per voertuigkilometer	- 70 -
Tabel 3.5 : Luchtvervuilingkosten van vrachttreinen, exclusief CO ₂ en CO, uitgedrukt in prijzen 2000 per voertuigkilometer	- 71 -
Tabel 3.6 : Luchtvervuilingkosten van binnenvaart, exclusief CO ₂ en CO, uitgedrukt in prijzen 2000 per voertuigkilometer	- 71 -
Tabel 3.7 : Luchtvervuilingkosten van CO ₂ en CO van vrachtwagens, uitgedrukt in prijzen 2000 per voertuigkilometer	- 72 -
Tabel 3.8 : Luchtvervuilingkosten van CO ₂ en CO van vrachttreinen, uitgedrukt in prijzen 2000 per voertuigkilometer	- 72 -
Tabel 3.9 : Luchtvervuilingkosten van CO ₂ en CO van binnenvaart, uitgedrukt in prijzen 2000 per voertuigkilometer	- 73 -
Tabel 3.10 : Congestiekosten voor wegvervoer uitgedrukt in euro per voertuigkilometer, in prijzen 2000.....	- 75 -
Tabel 3.11 : Congestiekosten voor trein en binnenvaart uitgedrukt in euro per voertuigkilometer, in prijzen 2000	- 75 -
Tabel 3.12 : Ongevalkosten voor wegvervoer uitgedrukt in eurocent per voertuigkilometer, in prijzen 2000.....	- 75 -
Tabel 3.13 : Ongevalkosten voor trein en binnenvaart uitgedrukt in euro per voertuigkilometer, in prijzen 2000	- 75 -
Tabel 3.14 : Geluidsoverlastkosten van weg en spoorverkeer uitgedrukt in eurocent per voertuigkilometer	- 76 -
Tabel 7.1 : Weergave van de afstanden van de verschillende trajectonderdelen van de multimodale binnenvaart	- 155 -
Tabel 7.2 : Weergave van de afstanden van de verschillende trajectonderdelen van het multimodaal spoortransport via V2	- 155 -
Tabel 7.3 : Weergave van de afstanden van de verschillende trajectonderdelen van het multimodaal spoortransport via V3	- 155 -
Tabel 7.4 : Weergave van de af te leggen afstand van het unimodaal wegtransport	- 155 -

XVI

Tabel 7.5 : Weergave van de coördinaten van de terminals en eindbestemming in functie van het referentiekader.	- 156 -
Tabel 7.6 : Weergave van de kilometerafhankelijke en kilometeronafhankelijke kosten van de vier transportalternatieven.	- 158 -
Tabel 7.7 : Weergave van de kilometerafhankelijke en kilometeronafhankelijke kosten van de vier transportalternatieven.	- 165 -
Tabel 7.8 : Weergave van de kilometerafhankelijke en kilometeronafhankelijke kosten van de vier transportalternatieven.	- 170 -
Tabel 7.9 : Weergave van de kilometerafhankelijke en kilometeronafhankelijke kosten van de vier transportalternatieven.	- 175 -

Hoofdstuk 1 : Probleemstelling goederentransport

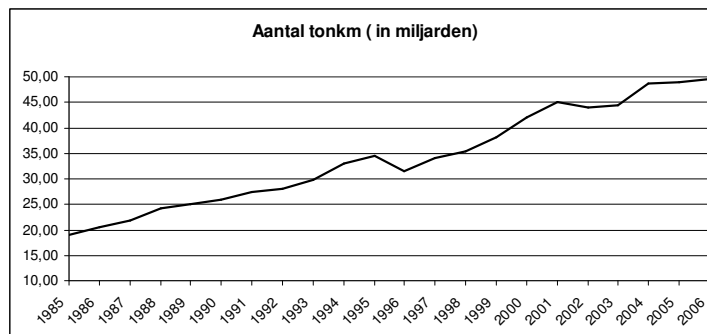
We beginnen dit hoofdstuk met een uitgebreide situering van het praktijkprobleem. Daarna formuleren en omschrijven we de centrale onderzoeksvraag. Deze splitsen we vervolgens op in meerdere deelvragen. Verder definiëren we enkele kernbegrippen en lichten we de gehanteerde werkwijze toe.

1.1 : Situering van het praktijkprobleem

Het vervoer en het transport hebben altijd een cruciale rol gespeeld in het maatschappelijk leven en de economie. Volgens Witlox (2007) is de vraag naar het transport een afgeleide behoefte en vertoont het een intermediair karakter. Dit komt doordat de verplaatsing ondergeschikt is aan het doel waarom men zichzelf of iets verplaatst. Het is de geografische scheiding van de plaatsen waar zich menselijke activiteiten voordoen, die aanleiding geven tot het ontstaan van een transportbehoefte of verplaatsingsnoodzaak.

Men kan op verscheidene manieren voorzien in deze transportbehoefte. Zo zal de vervoergebruiker de keuze hebben uit verschillende modi of combinaties van modi. In deze eindverhandeling worden enkel drie modaliteiten expliciet besproken, namelijk het weg-, spoor- en binnenvaarttransport. Hoewel de lucht- en scheepvaart hier niet behandeld worden, zullen de modellen die ontwikkeld worden in de hoofdstukken 4,5 en 6 er toch op kunnen toegepast worden. Het transport via pijpleidingen valt ook buiten het bestek van deze thesis, aangezien deze modus eerder een beperkt aandeel van het goederentransport in België voor zijn rekening neemt. De modellen kunnen echter wel, zoals bij de lucht- en scheepvaart, hierop toegepast worden mits men rekening houdt met de specifieke voorwaarden waaraan de goederen dienen te voldoen. In de volgende alinea bespreken we kort de huidige problematische situatie van het wegtransport in België met zijn paradoxen.

De evolutie van het wegtransport in de westerse landen was de laatste decennia niet minder dan spectaculair. Onderstaande figuur geeft de evolutie weer van het aantal getransporteerde tonkm over de Belgische wegen.



Figuur 1.1 : Voorstelling van de evolutie van het aantal getransporteerde tonkm over de Belgische wegen, op basis van cijfers van FEBIAC

In 1985 transporteerde het wegvervoer ongeveer 19 miljard tonkm, in 2006 bedroeg dit cijfer 49,5 miljard. Dit is maar liefst een stijging van 160 procent. FEBIAC (2007) voorspelt dat tegen 2030 deze waarde verder zal stijgen tot 65 miljard tonkm.

Een dergelijke snelle ontwikkeling van het aantal tonkm op de Belgische wegen heeft zonder twijfel de kwaliteit van het wegtransport in toenemende mate onder druk gezet. De gevolgen van deze explosieve groei zijn ons allen bekend. Zo denken wij ondermeer aan het steeds erger wordende probleem van verkeerscongestie, de nefaste impact van het wegvervoer op het milieu, de geluidsoverlast, het grote aantal ongevallen op de weg en de slinkende energievoorraden.

Aangezien het aantal voertuigkilometers op de Belgische wegen de laatste twintig jaar is toegenomen met 165 procent, is het niet verwonderlijk dat het wegtransport meer en meer hinder ondervindt van congestie. Waarschijnlijk het meest frappante voorbeeld in Vlaanderen is de E313-snelweg Antwerpen-Luik, aldus Gust Blauwens, professor aan de UA. 'De E313 is tot de belangrijkste verbinding tussen de Antwerpse haven en het Duitse Ruhrgebied uitgegroeid. Het resultaat is dat we nu met een autosnelweg zitten die elke dag tot ver boven zijn capaciteit wordt benut en dit terwijl de spoor- en binnenvaartinfrastructuur nauwelijks aangewend worden.' (De Standaard, 'E313-snelweg is verzadigd', 3 oktober 2007) Deze congestie is niet enkel onaangenaam, maar kost de samenleving ook handen vol geld. Naast deze kost verliest het wegtransport ook nog aan flexibiliteit, snelheid en betrouwbaarheid. Doordat er steeds meer voertuigen dezelfde verkeersinfrastructuur gebruiken, neemt het risico op ongevallen toe. In 2006 waren er ongeveer 3000 ongevallen waarbij een vrachtwagen betrokken was, dit is ongeveer 16,5 procent van alle ongevallen waarbij er slachtoffers vielen (STATBEL 2008). Volgens de verkeersveiligheidsbarometer zal het aantal ongevallen en verkeersdoden in 2007 hoger liggen dan in 2006. (De Standaard, T. Ysebaert, donderdag 6 maart 2008)

Naast de congestie- en ongevalkosten, worden we ons ook steeds meer bewust van de negatieve effecten van het wegtransport op het milieu en onze directe omgeving. We verstaan onder deze negatieve effecten ondermeer de uitstoot van schadelijke uitlaatgassen zoals CO₂ en NO_x, geluidsoverlast, visuele hinder, vibraties en gemeenschapscheiding. Van al deze effecten krijgt de uitstoot van uitlaatgassen en fijnedeeltjes de laatste jaren de meeste aandacht. Als we de verschillende modi vergelijken op basis van hun uitstoot van schadelijke gassen per tonkm, merken we op dat het wegtransport de tweede meest vervuilende modus is na het luchttransport. (Maibach et al., 2007) De wegtransportgerelateerde CO₂-uitstoot steeg van acht miljoen ton in het jaar 1980 tot ongeveer 15 miljoen ton in 2001, dit komt overeen met een stijging van ruim 87 procent. België is geen uitzondering: dergelijke procentuele stijgingen in de transportgerelateerde uitstoot van CO₂ vindt men in de meeste geïndustrialiseerde landen terug. (Observatorium voor duurzame consumptie, 2008) De onderstaande tabel geeft de evolutie weer van de uitstoot van CO₂ gassen in verschillende sectoren in Vlaanderen.

Sector	1990	2003 (% tov 1990)	2004 (% tov 1990)	2005* (% tov 1990)	Vershil 2005/1990
Energie	100	103,3	106,1	110,8	10,8%
Industrie	100	91,7	90,4	85,0	-15,0%
Gebouwen	100	127,4	124,5	120,2	20,2%
Transport	100	126,2	127,3	126,5	26,5%
Landbouw	100	86,1	84,7	84,9	-15,1%
Totaal	100	104,1	103,6	101,9	1,9%

Tabel 1.1 : Evolutie van de uitstoot van CO₂ door de verschillende sectoren, MIRA (2006)

Uit deze tabel blijkt dat in Vlaanderen de transportgerelateerde uitstoot van CO₂ relatief het sterkste gestegen is. Aangezien zowel de energie-, gebouwen- als transportsector een relatief aandeel hebben van ongeveer 20 procent in de totale CO₂ uitstoot in Vlaanderen, kunnen we stellen dat de transportsector hoofdzakelijk verantwoordelijk is voor de absolute toename in de CO₂ uitstoot in Vlaanderen. Het gevolg is dat in de loop van de laatste decennia het CO₂ gehalte boven het natuurlijk niveau uitgestegen is. Onderzoek heeft aangetoond dat er een sterk verband bestaat tussen de opwarming van de aarde en het CO₂ niveau in de atmosfeer. Aldus is de transportsector mede verantwoordelijk voor de problematiek rond de opwarming van de aarde. Aangezien dit probleem een wereldwijde aanpak vereist, heeft men in 1997 het Kyoto-verdrag afgesloten. Dit is in 2005 in werking getreden en bepaald ondermeer dat België zijn uitstoot van broeikasgassen tegen 2012 dient te verlagen tot 7,5 procent onder het niveau van 1990. Om deze doelstelling te kunnen behalen, dienen alle CO₂ uitstotende industrieën inspanningen te leveren. Dit geldt dus evengoed voor de transportsector. Uiteraard dient men rekening te houden met sectoriele verschillen in de marginale kosten voor het verlagen van de CO₂ uitstoot.

Waarschijnlijk een van de meest voor de hand liggende CO₂ reducerende maatregelen voor de transportsector is de verschuiving van het goederentransport over de weg naar alternatieve modi of combinaties van modi. We noemen deze verschuiving de modale shift van het transport. Door het construeren en uitbouwen van multimodale trajecten en netwerken is het mogelijk om het procentueel belang van het wegvervoer in het totaal transport te reduceren. Deze reductie heeft verscheidene voordelen.

- *Vooreerst* ontlast men de weginfrastructuur. Het gevolg hiervan is een daling van de congestieproblemen en kosten en een lager risico op ongevallen. Uiteraard zal de levensduur van de infrastructuur toenemen en de onderhoudskosten dalen.
- *Ten tweede* zal de totale transport gerelateerde CO₂ uitstoot mogelijk afnemen. Dit kan verklaard worden door het feit dat, zoals reeds gezegd, het wegtransport de tweede meest vervuilende transportmodus is, na het luchttransport. Indien een deel van het wegtransport vervangen wordt door CO₂ vriendelijkere modi, kan de totale uitstoot van het multimodale traject lager zijn dan het wegtransport. Dit laatste zal wel afhankelijk zijn van de noodzaak en de afstand van het voor- en natransport.

Het principe van de modale shift van het wegtransport naar het multimodaal vervoer, heeft het potentieel om verscheidene transportgerelateerde problemen te elimineren of te verbeteren. Dit kan gedeeltelijk verklaard worden door huidige inefficiënte modale verdeling van de totale vervoersvraag. Het wegtransport heeft een te groot aandeel, vergeleken met de alternatieve modi, in het totaal transport. Het gevolg is dan ook dat het wegennet gekarakteriseerd wordt door congestie, terwijl de binnenvaart- en spoorwegennet gekend staat voor hun overcapaciteit. Het is dus mogelijk om bepaald deel van het wegtransport te substitueren door alternatieve modi. Naarmate men meer en meer gebruik maakt van deze alternatieve modi in plaats van het traditioneel wegtransport, zal de overcapaciteit geleidelijk verdwijnen. Voor elk niveau van de totale transportvraag, zal er een punt bestaan waar dat de modale verdeling van de totale vervoersvraag optimaal is. In dit evenwichtspunt is er geen beweegreden meer om verder wegtransport te substitueren voor een specifiek gecombineerd transport of visa versa.

Zoals reeds hierboven vermeld, wordt de spoorweg- en binnenvaartmarkt in België, en meer algemeen in Europa, gekarakteriseerd door een infrastructurele onderbezetting. Er zijn dus met andere woorden nog multimodale mogelijkheden. Het is de vervoersgebruiker die uiteindelijk de beslissing neemt om al dan niet gebruik te maken van het gecombineerd transport. Hierbij dient de beleidsnemer de verschillende alternatieven met elkaar te vergelijken, en uiteindelijk het beste transportalternatief te identificeren. Dit is allesbehalve een eenvoudige opdracht. Een belangrijke taak is hiervoor weggelegd voor de overheid welke streeft naar een maatschappelijk optimum. Zij poogt door haar tussenkomst de vrije markt falingen te verhelpen. De belangrijkste markt falingen zijn de volgende: het niet internaliseren van externe kosten, geen rekening houden met de transgenerationale- en wereldsolidariteit, het belang van de multiplicatoreffecten niet in rekenschap brengen, geen rekening houden met de toekomstvisie, etc. De overheid probeert deze falingen te verhelpen en voorkomen door te informeren, verplichtingen en benchmarking op te leggen, te belasten of subsidies uit te keren.

Het opzet van deze eindverhandeling is om modellen te ontwikkelen die als beleidsinstrumenten kunnen aangewend worden bij het nemen van de hierboven vermelde transportbeslissingen. De modellen geven grafisch de gebieden weer waar elk transportalternatief het meest voordelige is. Indien de eindbestemming van het transport in een dergelijk gebied ligt, weet de beleidsnemer welk transportalternatief optimaal is voor de specifieke transportbehoefte. De vraag is echter op basis van welke elementen de verschillende transportalternatieven vergeleken zullen worden. We voorzien en ontwikkelen vier vergelijkingscriteria, namelijk het economisch, het ecologisch, het energetisch en het sociaal-economisch criterium.

- Het *economisch criterium* maakt gebruik van de totale logistieke kosten om de verschillende transportalternatieven te vergelijken met elkaar.
- Het *ecologisch criterium* gaat na wat de totale ecologische kosten zijn voor elk transportalternatief en zal deze gegevens gebruiken om de verschillende transportmogelijkheden te vergelijken met elkaar.

- Het *energetisch criterium* komt overeen met het ecologisch criterium met als enige verschil dat men voor elk transportalternatief de totale energetische kosten berekent in plaats van de ecologische.
- Het *sociaal-economische vergelijkingscriterium* maakt gebruik van het concept van sociaal-economische kosten. Hieronder verstaan we de optelsom van de totale logistieke kosten en de totale externe kosten die betrekking hebben op de specifieke transportalternatieven. Op basis van deze sociale kosten kunnen de verschillende alternatieven met elkaar worden vergeleken.

Aangezien we deze vier vergelijkingscriteria gebruiken in de modellen, kunnen we zowel de economische, ecologische, energetische en sociaal-economische haalbaarheidsgebieden berekenen voor de verschillende transportalternatieven. Een haalbaarheidsgebied van een transportalternatief x is een grafische regio waarbinnen de eindbestemming van het transport dient gelegen te zijn, opdat het transportalternatief x het voordeligste is van alle geconsidereerde mogelijkheden op basis van een specifiek vergelijkingscriterium. Indien de beleidsnemer zich enkel verantwoordelijk acht voor de totale logistieke kosten, dan dient hij gebruik te maken van het economisch vergelijkingscriterium. Indien hij echter ook rekening wil houden met de maatschappelijke kosten, dan dient de beleidsbeslissers gebruik te maken van het sociaal-economisch vergelijkingscriterium.

Deze vier vergelijkingscriteria, die de inputgegevens leveren voor de modellen, maken alle gebruik van kwantitatieve gegevens. Bij het economisch criterium geeft dit weinig problemen. Maar bij de andere drie kan dit soms tot problemen leiden. Zo zijn ondermeer de ecologische en externe kosten moeilijk meetbaar, omdat ze eigenlijk eerder kwalitatief van aard zijn. Vandaar dat we bij die criteria genoodzaakt zijn om te werken met schattingen en benaderingen. Een bijkomende moeilijkheid is de grote verscheidenheid in de geschatte waardes die men terug vindt in de literatuur. We hebben daarom in deze eindverhandeling gebruik gemaakt van zowel de meest recente en betrouwbaarste gegevens, als van verschillende scenario's.

1.2 : Centrale onderzoeksvraag

Zoals reeds in de vorige paragraaf vermeld, is het opzet van deze eindverhandeling het ontwikkelen van modellen die als beleidsinstrumenten kunnen aangewend worden bij het nemen van transportbeslissingen. Het gaat hier voornamelijk om de beslissing welk transportalternatief dient aangewend te worden voor het bevredigen van een specifieke transportbehoefte. De modellen beantwoorden deze vraag door grafisch de gebieden weer te geven waar elk transportalternatief het voordeligste is op basis van een gekozen vergelijkingscriterium. Indien de eindbestemming van het transport in een dergelijk gebied ligt, dan weet de beleidsnemer welk transportalternatief optimaal is voor de specifieke transportbehoefte. Het is de bedoeling om beter inzicht te krijgen in de mogelijkheden van gecombineerd transport en de concrete kostenbesparing die de vervoersgebruiker en/of de maatschappij kunnen realiseren door wegtransport te substitueren door multimodaal transport. Daarenboven gaan we na wat de impact is van deze substitutie op de ecologisch

maatschappelijke en energetische kosten. We onderzoeken voornamelijk de Belgische situatie. We dienen hierbij wel te vermelden dat bepaalde gegevens enkel beschikbaar zijn op Europees niveau. Om er voor te zorgen dat we de vooropgestelde doelstellingen van deze eindverhandeling realiseren, maken we gebruik van de volgende centrale onderzoeksvraag:

'Hoe kunnen wij de haalbaarheidsgebieden voor het multimodaal vervoer op een analytische wijze berekenen?'

1.3 : Deelvragen

Als wijze van ondersteuning van de hierboven vermelde centrale onderzoeksvraag, formuleren we in deze paragraaf een aantal relevante deelvragen. Deze vragen stellen ons in staat om het onderzoek op een structurele manier te gaan onderzoeken.

- Hoe kunnen we verschillende transportalternatieven economisch vergelijken met elkaar? Wat dienen wij te verstaan onder het begrip 'totale logistieke kost' en wat zijn de samenstellende elementen? Wat is de totale logistieke kostenstructuur van het unimodaal transport en het gecombineerd transport? Deze deelvraag handelt over het economisch vergelijkingscriterium.
- Hoe kunnen we verschillende transportalternatieven ecologisch vergelijken met elkaar? Wat zijn ecologische kosten en hoe worden ze veroorzaakt? Wat zijn de gemiddelde ecologische kosten per voertuigkilometer voor de drie belangrijkste transportalternatieven? Hoe ziet de ecologische kostenstructuur er uit voor het unimodaal en multimodaal transport? Deze deelvraag handelt over het ecologisch vergelijkingscriterium.
- Hoe kunnen we verschillende transportalternatieven energetisch vergelijken met elkaar? Wat zijn energetische kosten? Wat zijn de gemiddelde energetische kosten per voertuigkilometer voor de drie belangrijkste transportalternatieven? Hoe ziet de energetische kostenstructuur er uit voor het unimodaal en multimodaal transport? Deze deelvraag handelt over het energetisch vergelijkingscriterium.
- Wat zijn externe kosten en hoe worden ze veroorzaakt? Wat zijn de samenstellende elementen van externe kosten en hoe dienen ze gemeten te worden? Wat zijn de gemiddelde externe kosten per voertuigkilometer voor de drie belangrijkste transportalternatieven? Hoe ziet de externe kostenstructuur er uit voor het unimodaal en multimodaal transport? Deze deelvraag handelt over het sociaal-economisch vergelijkingscriterium.
- Hoe kunnen we analytisch de haalbaarheidsgebieden weergeven van zowel een specifiek unimodaal en een specifiek multimodaal transport als we veronderstellen dat deze twee de

enige transportalternatieven zijn en de kost van het natransport per tonkm overeenstemt met het unimodaal transport?

- Hoe kunnen we analytisch de haalbaarheidsgebieden weergeven van zowel een specifiek unimodaal en een specifiek multimodaal transport als we veronderstellen dat deze twee de enige transportalternatieven zijn en de kost van het natransport per tonkm niet overeenstemt met het unimodaal transport?
- Hoe kunnen we analytisch de haalbaarheidsgebieden weergeven van twee verschillende multimodale transporten als we veronderstellen dat deze twee de enige transportalternatieven zijn en de kost per tonkm van beide natransporten overeenstemmen? Wat gebeurt er als de kost per tonkm van beide natransporten niet gelijk zijn aan elkaar?
- Hoe kunnen we analytisch de verschillende haalbaarheidsgebieden weergeven van meer dan twee transportalternatieven?

1.4 : Nut van de analytische berekeningen

De analytische haalbaarheidsmodellen kunnen in verschillende transportsituaties worden toegepast. Het praktisch nut van deze modellen is afhankelijk van de situaties waarin het gebruik wordt. We onderscheiden drie belangrijke situaties.

- Er dienen goederen getransporteerd te worden van een vertrekpunt A naar een eindpunt B, waarbij zowel A als B een vaste locatie hebben. Het nut van het analytisch model in dit concreet geval is dat men op basis van de haalbaarheidsgebieden de optimale transportwijze voor elk vergelijkingscriteria kan bepalen. Men krijgt ook inzicht in de relatieve haalbaarheid van elke modi. De modellen kunnen in dit geval ook gebruikt worden om de relatieve impact van wijzigingen, bijvoorbeeld nieuwe overslag- en behandelingstechnieken, te berekenen en weer te geven.
- Indien er in de toekomst goederen dienen getransporteerd te worden van een vertrekpunt A naar een bepaalde eindregio, dan kunnen we door gebruik te maken van de analytische haalbaarheidsmodellen en op basis van een modi preferentie van de beleidsnemer, de quasi optimale locatie/gebied berekenen voor de eindbestemming B. Op deze locatie, of in het quasi optimale gebied, dient men dan de eindbestemming B te creëren.
- De modellen kunnen ook gebruikt worden door overheids- of private instanties die als doel hebben bepaalde alternatieve transportwijzen te stimuleren. Zij kunnen met deze modellen nagaan welke transportalternatieven optimaal zijn bij bepaalde trajecten en welke acties zij kunnen ondernemen om een bepaalde transportwijze aantrekkelijker te maken. Zij kunnen namelijk op een iteratieve wijze nagaan wat de invloed is van hun acties op de

haalbaarheidsgebieden en de uiteindelijk optimale transportwijze. Zo kunnen ze ondermeer nagaan wat de invloed is van bijkomende investeringen in zowel bestaande als nieuwe overslagterminals, en waar deze het best geplaatst worden.

1.5 : Definiëring van enkele belangrijke begrippen

In deze paragraaf beogen we een aantal aspecten en begrippen uit te leggen die verderop in deze eindverhandeling meermaals aan bod komen. Het is echter niet de bedoeling om alle aspecten en begrippen gedetailleerd uit te leggen, enkel de meest relevante begrippen worden aangehaald.

1.5.1 : Verkeer, transport en vervoer

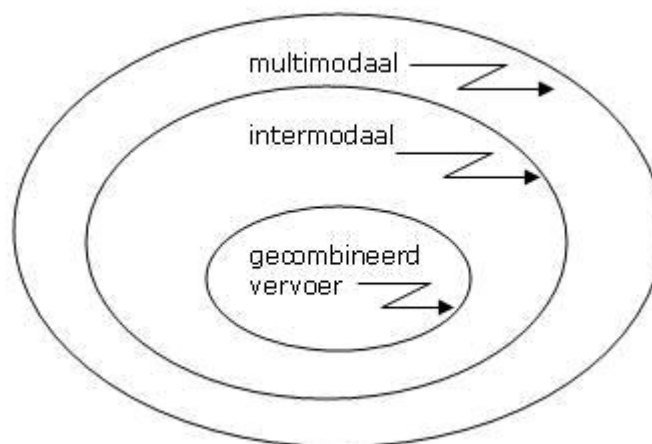
Hoewel we in deze eindverhandeling deze termen wisselend gebruiken en als gelijk beschouwen, dienen we op te merken dat sommige auteurs deze termen wel degelijk onderscheiden van elkaar. We denken ondermeer aan Blauwens et al. (1996) en Veelenturf et al. (1998). Verkeer wordt gezien als een begrip dat betrekking heeft op het gehele systeem dat verplaatsingen mogelijk maakt. Hierbij houdt men ook rekening met de infrastructuur en de verplaatsingsmiddelen. Verder definiëren ze transport als 'het totaal van activiteiten op het gebied van vervoer, opslag en informatie bij het verplaatsen van goederen en producten van oorsprong tot bestemming'. Dit concept omvat de gehele organisatie rond de werkelijke verplaatsingen, dus ook de tussentijdse opslag en informatiestroom. Vervoer definiëren ze als 'het verplaatsen van goederen naar een volgende bestemming'. Het gaat hier duidelijk om een werkelijke verplaatsing. (Ribus, 2007, p.10)

1.5.2 : Multimodaliteit, intermodaliteit en gecombineerd vervoer

Witlox (2007) maakt, zoals vele andere auteurs, een onderscheid tussen multimodaliteit, intermodaliteit en gecombineerd vervoer. Hij legt het verschil uit op de volgende manier: 'De inzet van twee of meer vervoerswijze binnen dezelfde deur-tot-deurverplaatsing is weliswaar in veel gevallen onvermijdelijk, maar dat wil nog niet zeggen dat daarmee een homogene vervoerdienst wordt aangeboden die door de verlader ook als zodanig wordt opgevat. Dat is in weze het verschil tussen **multimodale** en **intermodale** transportketens: in het ene uiterste geval vat de verlader de transportketen op als een opeenvolgende verschaffing van op zichzelf staande vervoersdiensten. In het andere uiterste geval wordt de betrokken keten als één vervoersdienst opgevat.' (Witlox, 2007, p.167) In de bovenstaande optiek kan een multimodale transportketen een meer of minder intermodaal karakter dragen. De mate waarin dit gebeurt wordt voornamelijk bepaald door de inspanningen die de ketenregisseur doet om de afzonderlijke schakels zo naadloos mogelijk op elkaar te laten aansluiten, om zo een homogene deur-tot-deurtransportdienst te benaderen. Witlox (2007) duidt dit streven naar homogeniteit aan als transportintegratie. Indien deze transportintegratie uitgevoerd wordt door een vervoerder, die de verschillende vervoerwijzen binnen één vervoersonderneming brengt, dan noemen we deze partij een 'integrator'. De transportintegratie kent

niet alleen een 'regiefunctie', maar heeft ook een technische dimensie, namelijk het al dan niet gebruiken van eenheidsladingen. Bij het intermodaal transport zal men steeds gebruik maken van een geunitiseerde vracht zodat de overslag tussen de verschillende modi efficiënt kan gebeuren. Het gebruik van een geunitiseerde vracht is bij het multimodaal transport geen noodzakelijke voorwaarde. Aldus wordt het intermodaal vervoer als een deelverzameling opgevat van het multimodaal vervoer (Witlox, 2007, p.168).

Volgens Witlox (2007) kan men binnen het intermodaal vervoer ook een deelverzameling worden onderscheiden, namelijk het **gecombineerd vervoer**. Hij definieert het als volgt: 'Het betreft het intermodale vervoer in Europa, waarvoor op het hoofdtraject gebruik wordt gemaakt van de spoorwegen, binnenvaart of kustvaart, terwijl voor- en natransport over de weg zo kort mogelijk gehouden wordt.' We kunnen de relatie tussen de drie termen als volgt weergeven:



Figuur 1.2 : Weergave van de relaties tussen de begrippen multimodaal, intermodaal en gecombineerd vervoer

We geven ter afsluiting ook nog de definities van de drie bovenstaande begrippen volgens de OECD (1997):

- Multimodaal vervoer: 'the carriage of goods by at least two different modes of transport in succession'.
- Intermodaal vervoer: 'the movement of goods which use successively several modes of transport without handling of the goods themselves in changing modes'.
- Gecombineerd vervoer: 'initial/terminal transport by road, major transport by rail, waterway or sea'.

Aangezien het de bedoeling is dat de ontwikkelde modellen kunnen toegepast worden in een zo breed mogelijk kader van transportbeslissingen, spreken we in deze eindverhandeling enkel over het multimodaal vervoer/transport. Aangezien de concepten intermodaal en gecombineerd vervoer een

deelverzameling zijn van het multimodaal vervoer/transport, is het echter steeds mogelijk om de resultaten van de analyse en modellering toe te passen op specifieke situaties of gevallen.

1.5.3 : Haalbaarheidsgebied

In het hoofdstuk 4, 5, 6 en 7 wordt herhaaldelijk gebruik gemaakt van de term haalbaarheidsgebied. Elk transportalternatief heeft normaal gezien een haalbaarheidsgebied. Dit haalbaarheidsgebied wijst op een grafische regio waarbinnen de eindbestemming van het transport gelegen dient te zijn opdat het geconsidereerde transportalternatief het voordeligst is ten opzichte van alle andere mogelijkheden en op basis van een gekozen vergelijkingscriterium. Met andere woorden: indien de eindbestemming van het transport binnen het haalbaarheidsgebied van het transportalternatief x ligt, dan is dit alternatief de voordeligste manier waarop de goederen kunnen getransporteerd worden op basis van het gekozen vergelijkingscriterium. Het is echter mogelijk dat een bepaald transportalternatief geen haalbaarheidsgebied heeft. In dit laatste geval zal er geen enkel punt zijn waar de eindbestemming dient te liggen opdat het specifiek transportalternatief voordeliger zal zijn dan de andere mogelijkheden. De haalbaarheidsgebieden worden berekend voor elk alternatief op basis van een vergelijkingscriterium. Aangezien we gebruik maken van vier vergelijkingscriteria, kunnen de transportalternatieven in deze eindverhandeling maximaal vier haalbaarheidsgebieden hebben, namelijk één haalbaarheidsgebied voor elk verschillend vergelijkingscriterium. Naarmate men meer vergelijkingscriterium definieert en gebruikt, des te groter het maximum aantal haalbaarheidsgebieden voor elk transportalternatief.

1.6 : Werkwijze

We gebruiken in deze eindverhandeling drie verschillende onderzoeksstrategieën. Vooreerst gaan we een literatuurstudie uitvoeren waar we theoretisch onderzoek doen naar de vier verschillende vergelijkingscriterium, namelijk het economisch, sociaal-economisch, ecologisch en energetisch criterium. Er zal onderzocht worden hoe men de totale logistieke, ecologische, energetische en externe kosten van transportalternatieven kan berekenen voor verschillende trajecten. Er wordt hierbij gesteund op wetenschappelijke boeken, studies, artikels en informatie op het internet.

In hoofdstuk twee worden de bevindingen van het theoretisch onderzoek naar het economische vergelijkingscriterium weergegeven. We beantwoorden er de eerste deelvraag. We behandelen er zowel de samenstellende logistieke kostenelementen, als de modellering van het economisch vergelijkingscriterium. Hierbij dienen de economische kosten opgedeeld te worden in tijds- en kilometerafhankelijke kosten en vaste kosten. In hoofdstuk twee worden verschillende formules weergegeven die nodig zijn bij de berekening van de economische kosten van unimodale en multimodale transportalternatieven.

In hoofdstuk drie formuleren we onze bevindingen van ons theoretisch onderzoek naar het sociaal-economisch, ecologisch en energetisch vergelijkingscriterium. We beantwoorden de tweede, derde en vierde deelvraag. We gaan na wat de ecologische, energetische en externe kosten zijn, hoe ze veroorzaakt worden en hoe veel ze bedragen voor de verschillende transportalternatieven. Verder modelleren we de ecologische, energetische en sociaal-economische vergelijkingscriteria.

De tweede onderzoeksstrategie bestaat uit het wiskundig afleiden van drie typen van basismodellen en twee variaties hierop. De resultaten hiervan worden weergegeven in de hoofdstukken vier, vijf en zes. Deze stemmen overeen met de deelvragen vijf, zes, zeven en acht. In hoofdstuk vier ontwikkelen we een analytisch model dat de haalbaarheidsgebieden kan weergeven van zowel een specifiek unimodaal als een specifiek multimodaal transport waarbij we veronderstellen dat deze twee de enige transportalternatieven zijn en de kost van het natransport per tonkm overeenstemt met het unimodaal transport.

In het vijfde hoofdstuk beantwoorden we de zesde deelvraag. We ontwikkelen er een model waarmee je de haalbaarheidsgebieden kan berekenen en weergeven van zowel een specifiek unimodaal als een specifiek multimodaal transport. We veronderstellen hierbij wel dat deze twee de enige transportalternatieven zijn en de kost van het natransport per tonkm niet overeenstemt met het unimodaal transport.

In het zesde hoofdstuk geven we de resultaten weer van twee variaties op de twee bovenstaande modellen en ontwikkelen we een derde haalbaarheidsmodel. We beantwoorden de zevende en achtste deelvraag. De twee varianten zijn gelijkaardig aan het eerste en tweede model, met als enigste verschil de type transportalternatieven die vergeleken worden met elkaar. De twee modellen tot hiertoe vergeleken steeds één type van unimodaal transport met één type van multimodaal transport. De twee varianten vergelijken twee vormen van multimodale transportalternatieven met elkaar. Het derde model laat ons toe om meer dan twee alternatieven tegelijk met elkaar te vergelijken. Dit laatste model aanzien we als het meest realistisch en flexibel van alle ontwikkelde modellen.

De derde onderzoeksstrategie bestaat uit het toepassen van de ontwikkelde modellen op een realistische transportsituatie in België. De bedoeling is inzicht te krijgen in de haalbaarheidsgebieden van de verschillende transportalternatieven bij deze specifieke transportsituatie.

Hoofdstuk 2 : Analyse van de totale logistieke kostprijs

2.1 : Inleiding

Het vervoer is in de loop van de geschiedenis van essentieel belang geweest voor de goede functionering van de economie en het maatschappelijk leven. De behoefte van de mens om goederen te verplaatsen staat zelden op zich, maar ontleent haar nut doorgaans aan andere activiteiten. Het transport vertoont bijgevolg een afgeleid karakter omdat het in samenhang met de beoogde activiteit dient te worden beschouwd. Via het vervoer wordt namelijk aan goederen en diensten een waardevermeerdering verschaft. Deze waardevermeerdering wordt verwezenlijkt doordat het transport de goederen naar een locatie brengt waar ze 'nuttiger' gebruikt kunnen worden. (Witlox, 2006, p.6)

Uitgaande van deze kenmerken, is het duidelijk dat elke onderneming geconfronteerd wordt met transportbehoeften. Een onderneming kan op drie manieren voorzien in deze behoeften, namelijk door eigen transport te organiseren, een beroepvervoerder inschakelen ofwel een combinatie van beide. Onafhankelijk van de gekozen manier, dient de onderneming te bepalen welke modus of modi hij wenst in te schakelen. Men heeft de keuze uit het wegvervoer, de binnenvaart, het spoor, de luchtvaart, het zeevervoer, 'short sea shipping', pijpleiding of een combinatie van deze, namelijk het multimodaal vervoer.

Uit het bovenstaande blijkt dat ondernemingen meerdere transportgerelateerde beslissingen dienen te nemen. Voor de vervoersgebruiker is het uiteindelijke doel het kiezen van de optimale transportwijze. Maar wat is de optimale transportwijze en hoe kunnen we deze achterhalen? Uiteraard bestaat er niet één optimale transportwijze. Elke transportbehoefte dient afzonderlijk geanalyseerd te worden om zo de optimale of quasi optimale transportwijze te identificeren. De manier waarop we de mogelijke transportalternatieven analyseren zal afhankelijk zijn van het gekozen uitgangspunt. Volgens Gray (1982) kunnen alle mogelijke uitgangspunten tot het kiezen van een transportwijze en traject ondergebracht worden in acht klassen. Deze zijn het macro-economische uitgangspunt, het 'inventory-theoretic' uitgangspunt, de regressieanalyse, het abstracte uitgangspunt, lineaire programmering, discriminatieanalyse, 'logit' analyse en de 'probit' analyse (McKinnon et al. 2002, p 163). In dit hoofdstuk passen we het 'inventory-theoretic' uitgangspunt toe. Hierbij zal men de gepaste modus of combinatie van modi kiezen op basis van trade-off's tussen hun snelheid, transportkosten, betrouwbaarheid, voorraadkosten en ontwaardingkosten¹. (Baumol, Vinod, 1970, p. 413). Om deze vier elementen te integreren in de transportbeslissing hebben Baumol en Vinod (1970) het concept van '*Total logistics costs*' geïntroduceerd. Deze benadering veronderstelt dat de vervoergebruiker bij de transportbeslissing zowel rekening houdt met de door hem gedragen economische kosten van het transport als de transportgerelateerde kosten van zijn klant of

¹ Voor meer informatie omtrent het inventory-theoretic model, en de voor- en nadelen hiervan, verwijzen we naar bijlage 1

leverancier (Button, K., 1993, p. 68). Indien het gaat om het intern transport binnen een organisatie, zal men geen rekening dienen te houden met de kosten van de klant of leverancier.

Het doel van dit hoofdstuk is om op een systematische manier de verschillende totale logistieke kostencomponenten te overlopen, welke beïnvloed worden door de transportbeslissing. De bevindingen van Blauwens et al. (2001) geven ons hiervoor een goede vertrekbasis. Ze kwamen tot de conclusie dat de logistieke kostprijs van het transport bestaat uit een negental elementen, met name:

1. Transportkosten
2. Kosten van goederenbehandeling
3. Voorraadkosten
4. Kosten van voorraadtekort
5. Verpakkingkosten
6. Orderbehandeling- en administratiekosten
7. Instelkosten
8. Kosten van klantenservice
9. Kosten van de vestigingsplaats

Vooraleer we deze negen kostenelementen uitvoerig zullen bespreken en analyseren in de volgende paragrafen, dienen we de lezer het volgende op te merken: hoewel men traditioneel veel gebruik maakt van economische vergelijkingscriterium voor de beoordeling van verschillende transportalternatieven, zoals ondermeer de '*inventory theoretical approach*', is het ook mogelijk om alternatieve vergelijkingscriteria te gebruiken. In het volgende hoofdstuk bespreken we drie zulke maatstaven, met name de sociaal-economische, ecologische en energetische vergelijkingscriterium.

2.2 : De transportkosten

In deze paragraaf bespreken we het deel van de logistieke kosten welke rechtsreeks veroorzaakt worden door het transport. Zoals we reeds in de inleiding vermeld hebben, dient de vervoersgebruiker te kiezen tussen eigen- of beroepsvervoer. Wanneer men een beroepvervoerder inhuurt, dient de vervoersgebruiker de overeengekomen vervoerprijs te betalen. Deze transportkosten komt dan overeen met de vervoerprijs. Indien de vervoergebruiker zelf het transport uitvoert, zullen de transportkosten gelijk zijn aan de rechtstreeks veroorzaakte kosten binnen de organisatie van de vervoersgebruiker. Het is voor de hand liggend dat de transportkosten voor het eerste geval makkelijker te berekenen zijn dan voor het tweede geval. In het laatste geval kunnen we de transportkosten berekenen door gebruik te maken van uur- en kilometercoëfficiënten. Hierbij gaan we uit van een opsplitsing tussen tijd- en kilometerkosten. Uiteraard worden deze kosten beïnvloed door schaalvoor- en nadelen van de gebruikte modi.

2.2.1 : Tijd- en kilometerkosten

De bedoeling is om de transportkosten op te splitsen in een tijds- en een kilometerafhankelijk deel en een constant deel om aldus beter inzicht te krijgen in de onderliggende kostenstructuur.

Onder **tijdkosten** verstaan we kosten welke toegewezen kunnen worden aan afzonderlijke vervoersprestaties op basis van het aantal gepresteerde uren. Hierbij gedraagt de tijd zich als relevante verdeelsleutel. Tijdkosten ontstaan zowel tijdens het verplaatsen, stilstaan, laden, lossen als oponthoud. Voorbeelden van deze tijdkosten zijn ondermeer de lonen van de bestuurders van de modi en de huurprijs van de containers.

Op een analoge manier kunnen we de **kilometerkosten** definiëren : het zijn de kosten welke we kunnen toewijzen aan afzonderlijke vervoersprestaties op basis van het aantal gereden kilometers. Hierbij gedraagt de aantal kilometers zich als de relevante verdeelsleutel. Deze kosten ontstaan enkel bij het verplaatsen en, in tegenstelling tot de tijdkosten, niet bij het stilstaan, lossen, laden en oponthoud. Voorbeelden van deze kilometerkosten zijn ondermeer het brandstofgebruik, onderhoud en kilometervergoeding voor het personeel.

Uiteraard passen niet alle transportkosten even goed in deze tweeledige indeling. Deze kosten worden om die reden ondergebracht in het 'constante deel'. Ze zijn onafhankelijk van zowel het aantal kilometer als de tijd. Voorbeelden hiervan zijn tolgelden, havengelden, douane kosten, commissie lonen, overslaggelden, etc.

Een speciaal geval zijn de afschrijvingen van de modi. Blauwens et al. (2001) stellen voor om deze kost op te splitsen in een variabel en een vast gedeelte. Het vast gedeelte kunnen we dan onderbrengen bij de tijdkosten. De variabele afschrijvingen dienen we op zijn beurt onder te brengen bij de kilometerafhankelijke kosten.

We zullen de tijdkosten uitdrukken als een specifiek bedrag per uur, welke we dan het uurcoëfficiënt noemen. De kilometerafhankelijke kosten drukken we uit als een specifiek bedrag per kilometer en noemen we het kilometercoëfficiënt. We kunnen de transportkosten voor een specifiek geval berekenen door de afgelegde afstand te vermenigvuldigen met de kilometercoëfficiënt en dit op te tellen bij de constante kosten en de vermenigvuldiging van de tijd die het voertuig nodig had om de vervoersprestatie te leveren met het uurcoëfficiënt (Button, 1993, p 87). We verkrijgen aldus de volgende uitdrukking:

$$TK = u.U + d.D + C$$

Met TK : Totale transportkost uitgedrukt in EUR/ton

u : Uurcoëfficiënt uitgedrukt in EUR/(ton x uur)

U : Besteedde transporttijd in uren

- d : Kilometercoëfficiënt uitgedrukt in EUR/tonkm
- D : Afgelegd aantal kilometers
- C : Vaste kosten uitgedrukt in EUR/ton

Zowel de uur- als de kilometercoëfficiënt kan men berekenen met boekhoudkundige gegevens. Hierbij dient men uiteraard een voldoende lange periode in beschouwing te nemen. Voor elk vervoersalternatief kan men best apart de tijd- en kilometerkosten registreren. Om de gewenste uur- en kilometercoëfficiënt te bekomen, dient men na het verloop van een vooraf bepaalde periode respectievelijk de totale tijdskosten te delen door het aantal uren en de totale kilometerkosten te delen door het totaal aantal afgelegde kilometers.

2.2.2 : Schaalvoordelen

Wanneer men tabel 2.1 analyseert, valt het verschil in de uur- en kilometercoëfficiënt per tonkm van de verschillende types modi meteen op. Volgens Button (1993) kan dit verschil verklaard worden door drie types van schaalvoordelen, namelijk voordelen van grotere modi, voordelen van betere infrastructuur en voordelen van een grote vloot.

	1950	1998
Spoor	180	90
Binnenvaart	75	60
Weg	400	200
Lucht	7500	440

Tabel 2.1 : Gemiddelde prijs in EUR per tonMm voor verschillende modi in Nederland uitgedrukt in prijzen van 1990, Rietveld et al. (2004) p. 236

Schaalvoordelen grotere modi

Het verschil tussen de uur- en kilometercoëfficiënt van verschillende types modi wordt gedeeltelijk verklaard door de discrepantie tussen de laadcapaciteit van de verschillende modi. Naarmate de laadcapaciteit van een modus toeneemt, zullen logischerwijs de transportkosten ook toenemen. Deze stijging is echter niet proportioneel aangezien schaalvoordelen een belangrijke rol spelen. Hierdoor zal de uur- en kilometercoëfficiënt, welke uitgedrukt wordt per ton, dalen bij een ceteris paribus toename van de laadcapaciteit van een modus. Dit wordt ondermeer waargenomen in de binnenvaart, het wegvervoer, zee- en luchtvervoer. Indien we nu twee verschillende types van modi vergelijken met elkaar, zal de kans reëel zijn dat de modus met de grootste laadcapaciteit de laagste uur- en kilometercoëfficiënt heeft. We dienen hierbij wel rekening te houden dat zowel het spoor- en luchtvervoer als binnenvaart meestal voor- en/of natransport vereisen. Hierdoor zullen de transportkosten van deze modi aanzienlijk stijgen. De kosten van het voor- en natransport en de overslag van de getransporteerde goederen wegen op tegen de gecreëerde schaalvoordelen. De vraag of de schaalvoordelen van het multimodaal traject de extra kosten tenietdoen, dient voor elk

geval apart bekeken te worden. We verwijzen hierbij naar de hoofdstukken vier, vijf en zes, waar we algemene haalbaarheidsmodellen voor het multimodaal vervoer ontwikkelen.

Schaalvoordelen veroorzaakt door infrastructuur

Wanneer men investeert in een infrastructuur in een bepaalde regio, zullen de modi die van deze infrastructuur gebruik maken een voordeel bekomen ten opzichte van de andere modi. Dit voordeel bestaat uit een lagere uur- en/of kilometercoëfficiënt. Het voordeel wordt verwezenlijkt doordat de nieuwe infrastructuur de modi toelaat sneller en efficiënter hun vracht te vervoeren. Zo zal men bijvoorbeeld bij het uitbaggeren van een bepaalde vaarweg grotere types van binnenvaartschepen kunnen inzetten.

Schaalvoordelen veroorzaakt door vlootvorming

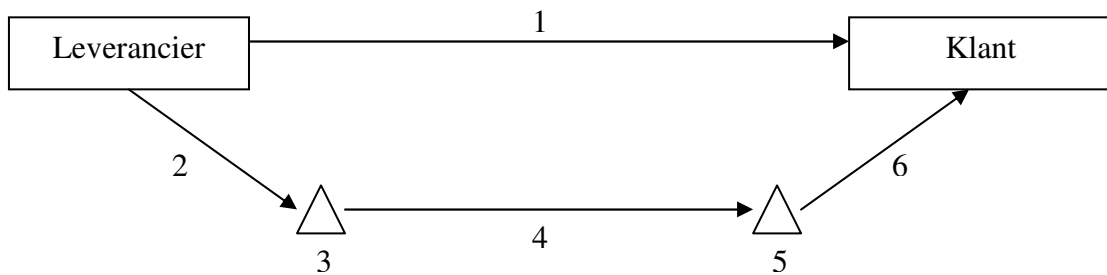
Het verschil tussen de uur- en kilometercoëfficiënt van de verschillende types modi kan ook gedeeltelijk verklaard worden door vlootvorming bij de vervoersaanbieder. Een grote vloot van een bepaalde modus kan tot schaalvoordelen leiden in het onderhoud, standaardisatie, brandstofaanschaf, rittenplanning, etc. Uiteraard worden deze voordelen getemperd door verhoogde administratie- kosten en problemen. Button (1993) merkt twee belangrijke beperkingen op. Vooreerst is het nog niet bewezen dat er voor alle modi mogelijkheden zijn tot het bekomen van schaalvoordelen via vlootvorming. Ten tweede moet men rekening houden dat schaalvoordelen slechts gelden tot op een bepaald niveau.

2.3 : Kosten van goederenbehandeling

Dit zijn de kosten die ontstaan wanneer goederen worden geladen, gelost en overgeslagen. De structuur van deze kosten wordt in grote mate bepaald door vijf factoren. Het zijn de huur of aanschaf van de superstructuur (zoals ondermeer kranen), de personeelskost voor arbeiders, bedienden en het management, de investering en financiering van de terminalinfrastructuur, de onderhoud- en herstellingskosten voor zowel de infrastructuur als de superstructuur en als laatste de overige kosten zoals verzekeringen en dergelijke.

Wanneer men de verschillende modi vergelijkt op basis van deze kosten, merkt men op dat er zich grote verschillen voordoen. Zo kost bijvoorbeeld de overslag van een container op een schip beduidend meer dan de overslag van dezelfde container op een vrachtwagen (Blauwens et al. 2001). Indien men kiest voor het multimodaal transport zullen de kosten van goederenbehandeling meestal hoger zijn als die van het unimodaal transport. Dit komt door de extra overslag die noodzakelijk is tussen het hoofdtransport en het voor- en natransport. Figuur 2.1 illustreert het voorgaande. Aangezien de kosten van goederenbehandeling aanzienlijk kunnen oplopen, is het voor het

multimodaal vervoer van primordiaal belang dat initiatieven genomen worden om deze kost terug te drijven. Dit kan men ondermeer doen door het verdere unificeren van de ladingen en verpakkingen en investeren in nieuwe overslagtechnieken.



Figuur 2.1 : Vergelijking overslag unimodaal met multimodaal transport

Verklaring van de cijfers bij de figuur:

1. Unimodaal transport
2. Voortransport
3. Terminalbehandeling
4. Hoofdtransport uitgevoerd door alternatieve modus
5. Terminalbehandeling
6. Natransport

2.4 : Voorraadkosten

2.4.1 : Inleiding

In deze paragraaf analyseren we de voorraadkosten. Het vervoer veroorzaakt deze kosten aangezien het transport van goederen onvermijdelijk voorraadvorming met zich meebrengt. Deze voorraadvorming doet zich voor in opslagplaatsen en tijdens het transport. Het is niet het opzet om de voorraadkosten te elimineren, maar om ze te optimaliseren. Er zijn namelijk naast de kosten ook voordelen verbonden met het aanhouden van een voorraad. Chase et al. (2006) geven vijf redenen voor het aanhouden van een specifieke voorraad.

1. Het behouden van de onafhankelijkheid van operaties
2. Om variatie in de vraag naar producten te voorzien
3. Flexibiliteit aan het productieschema geven
4. Bescherming tegen variatie in de levertijd
5. Economisch voordeel van aankoop in grote aantallen

De voorraadkosten, welke afgewogen dienen te worden met de bovenvermelde voordelen van het houden van een voorraad, kunnen volgens Chase et al. (2006) opgesplitst worden in vijf delen, met name de **interestkosten, verzekeringskosten, magazijnkosten, goederenbehandelingskosten**

en **ontwaardingkosten**. Deze voorraadkosten vertegenwoordigen een groot gedeelte van de totale logistieke kost van het transport. Zo maakte in 2003 de voorraadkost 32 procent uit van de totale logistieke kost van het transport in de VS (Trunick, P. 2004). Vooraleer we overgaan naar de systematische analyse van deze vijf kostencomponenten, bespreken we eerst de verschillende types van voorraad die beïnvloed worden door het transport.

2.4.2 : Verschillende types voorraden

McKinnon et al. (2002) maakt een onderscheid tussen verschillende types van voorraad gebaseerd op hun bestaansreden. Aangezien niet elk voorraadtype even sterk beïnvloed wordt door het transport, bespreken we enkel de meest beïnvloede types van voorraad. Deze zijn de voorraad tijdens het vervoer, de cyclische voorraad en de veiligheidsvoorraad.

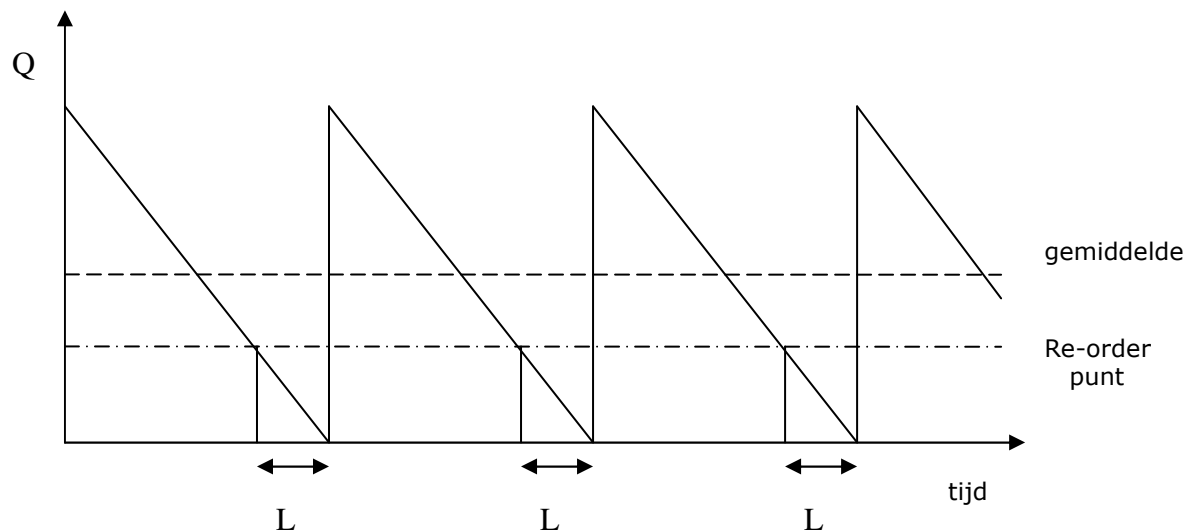
2.4.2.1 : In transit voorraad

Tijdens het transport worden goederen opgeslagen in de modus zelf. McKinnon et al. (2002) merkt op dat we deze tijdelijke opslag dienen te beschouwen als een voorraad. Dit type van voorraad zal, net zoals de andere types, voorraadkosten veroorzaken. Meer specifiek veroorzaakt het interestkosten, verzekeringskosten en ontwaardingkosten. Indien de vervoersgebruiker een container huurt, zullen deze kosten ook in consideratie dienen genomen te worden. Indien de vervoergebruiker eigenaar is van de container, dient deze de afschrijving van de gebruikte container in rekenschap te brengen. Des te sneller de gebruikte modus, des te kleiner de resulterende voorraad tijdens het transport. Des te groter de (gebruikte) laadcapaciteit van een modus, des te groter de voorraad tijdens het vervoer zal zijn. Uit het bovenvermelde kunnen we afleiden dat de kosten van dit type voorraad duidelijk in het nadeel spelen van de binnen- en zeevaart.

2.4.2.2 : Cyclische voorraad

Wanneer de vervoersgebruiker goederen transporteert naar een bepaalde locatie, zullen deze goederen bij aankomst in de voorraad opgeslagen worden. Hoeveel goederen per keer worden aangevoerd, is afhankelijk van het gebruik ervan, tussen dit tijdstip en de volgende gelijkaardige levering. Het verloop van deze voorraad vertoont een cyclisch patroon, vandaar de naam cyclische voorraad. We kunnen dit patroon als volgt beschrijven: Bij de aankomst van een partij goederen zal het voorraadniveau stijgen tot een welbepaald maximum. In de veronderstelling dat er een vaste afname van deze goederen plaats vindt en er geen veiligheidsvoorraad aangehouden wordt, zal het maximale voorraadniveau gelijk zijn aan de bestelhoeveelheid. Vervolgens wordt het voorraadniveau afgebouwd volgens een vooraf bepaald verbruiksritme. Aangezien we er vanuit gaan dat de leveringstermijn constant is, zal het re-order punt, welke het punt is waarop men opnieuw goederen besteld, gelijk zijn aan de hoeveelheid goederen die gebruikt worden tijdens de leveringstermijn. De levering zal plaats vinden op het ogenblik wanneer de voorraad uitgeput is. Indien het verbruiksritme

uniform verdeeld is, zal gemiddeld genomen de helft van de geleverde hoeveelheid in voorraad liggen. Onderstaande figuur geeft deze cyclus weer. (Chase et al. 2006)



Figuur 2.2 : Weergave cyclusvoorraad, Chase et al. 2006

Hoewel de gemaakte veronderstellingen leiden tot een eenvoudige voorstelling van de cyclus, zijn ze in de meeste gevallen niet realistisch. Het bestaan van discrepanties tussen het verwachte en het werkelijk verbruiksritme tijdens de 'lead time' en de variaties die zich kunnen voordoen in de leveringstermijnen, creëert de behoefte voor een veiligheidsvoorraad (Chase et al. 2006).

2.4.2.3 : Veiligheidsvoorraad

Chase et al. (2006) definiëren de veiligheidsvoorraad als volgt: het verschil tussen de totale voorraad en de verwachte gevraagde hoeveelheid van een bepaald goed. Het is dus met andere woorden de voorraad die men bovenop de cyclische voorraad aanhoudt. Ze dient als buffer tegen de onzekerheid van enerzijds de vraag van interne of externe klanten en anderzijds de leveringstermijn van de goederen. Vandaar dat de veiligheidsvoorraad ook wel eens de buffervoorraad genoemd wordt.

Zoals reeds boven vermeld wordt de grootte van de veiligheidsvoorraad beïnvloed door de variatie in de leveringstermijn en vraag naar de goederen. Des te groter de variatie, des te groter de veiligheidsvoorraad (McKinnon et al., 2002, p. 158). Indien we de totale logistieke kost van een transportalternatief willen berekenen, dienen we uiteraard de grootte van de veiligheidsvoorraad te kennen. Hiertoe worden voornamelijk twee methoden gebruikt.

De **eerste methode** veronderstelt dat de levertermijn en de vraag tijdens deze levertermijn poisson verdeeld zijn. Hierdoor worden de onzekerheden als stochastische elementen behandeld. Baumol en Vinod (1970) hebben op basis van deze veronderstelling de uitdrukking van de veiligheidsvoorraad afgeleid, welke hieronder weergegeven wordt.

$$\text{Veiligheidsvoorraad} = M \sqrt{[s + t]T}$$

Vooraleer we de veiligheidsvoorraad kunnen berekenen, dienen we vier parameters te kennen. De eerste parameter is de 'T': deze stemt overeen met de totale hoeveelheid goederen die op jaarbasis getransporteerd worden. De tweede parameter is de 's': deze geeft de gemiddelde tijd weer tussen twee leveringen. De derde parameter is de 't': deze geeft de gemiddelde levertijd weer. De optelsom van s met t kunnen we eenvoudig interpreteren: het is namelijk de maximale vertraging die zich kan voordoen bij het vervullen van een order (Baumol et al., 1970, p. 418-19). De vierde en laatste parameter is de 'M' een staat voor de Poisson multiplicator. Uit bovenstaande vergelijking kunnen we concluderen dat een ceteris paribus toename van t en/of s zal leiden tot een grotere veiligheidsvoorraad.

De tweede methode die vaak gebruikt wordt om de veiligheidsvoorraad te berekenen, veronderstelt dat de vraag tijdens de leveringstermijn normaal verdeeld is. Dit betekent dat gedurende de leveringstermijn het verbruiksritme theoretisch elke waarde kan aannemen. Men dient op basis van steekproeven de standaardafwijking van de vraag tijdens de levertermijn te bepalen. Eenmaal men deze waarde kent, dient men enkel de gewenste veiligheidsgraad te bepalen om zo de veiligheidsvoorraad te berekenen. De formule wordt hieronder weergegeven (Chase et al. 2006).

$$\text{Veiligheidsvoorraad} = K \times \sigma_L$$

Deze formule kan men op een eenvoudige manier verklaren: Indien we uitgaan dat de vraag tijdens de leveringstermijn normaal verdeeld is, zal σ_L de standaardafwijking voorstellen van de vraag tijdens de leveringstermijn. Indien we vooropstellen dat we slechts P% kans (P-waarde) willen hebben op een stockout, dan kunnen we door gebruik te maken van de cumulatieve Z tabel berekenen hoeveel standaardafwijkingen voorraad we extra dienen aan te houden om werkelijk maar 1% risico op stockout te lopen. Aangezien de Z-waarde, welke overeenstemt met de parameter K, dimensieloos is, dient deze waarde nog vermenigvuldigd te worden met de standaardafwijking. Aldus bekomen we het gewenste veiligheidsvoorraad niveau. Voor bijvoorbeeld een 1% kans op een stockout, zal de Z-waarde ongeveer 2.33 bedragen.

Zoals reeds hierboven vermeld dient de standaardafwijking van de vraag tijdens de levertermijn op steekproefwijze worden vastgesteld. Het is echter belangrijk om inzicht te hebben in de samenstellende delen van deze standaardafwijking en dit met het oog op eventuele variantiereductie. Des te kleiner de standaardafwijking, des te kleiner de noodzakelijke veiligheidsvoorraad uitgaande van een bepaalde P-waarde. Volgens Silver et al. (1985) kan men de standaardafwijking opsplitsen in vier elementen. Deze zijn de gemiddelde levertijd (t), de variantie van de levertijd (σ^2_t), de gemiddeld verwachte vraag (D) en de variantie van de vraag per dag (σ^2_D).

Indien we veronderstellen dat de levertijd onafhankelijk is van de vraag en op voorwaarde dat de vraag geen autocorrelaties vertoont, kunnen we de standaardafwijking van de vraag tijdens de levertermijn als volgt berekenen (Silver et al. 1985).

$$\sigma_L = \sqrt{t\sigma_D^2 + D^2 \times \sigma_t^2}$$

Indien we veronderstellen dat de levertijd wel afhankelijk is van de vraag, dan bekomen we de volgende vergelijking (Silver et al. 1985).

$$\sigma_L = \sqrt{t \times \sigma_D^2 + D^2 \times \sigma_t^2 + \sigma_t \times \sigma_D}$$

De opsplitsing van de standaardafwijking van de vraag tijdens de levertermijn laat ons nu toe om de impact van de verschillende modi op de veiligheidsvoorraad te beoordelen. Uit de bovenstaande formules kan men duidelijk afleiden dat zowel de snelheid van de modi als de betrouwbaarheid ervan een grote invloed heeft op de veiligheidsvoorraad. Des te sneller en betrouwbaarder de modus, des te kleiner t en σ_t^2 , des te kleiner de standaardafwijking van de vraag tijdens de levertermijn. Hierdoor kan men de veiligheidsvoorraad verlagen en toch nog dezelfde kans op een voorraadtekort behouden. Indien men kiest om dezelfde veiligheidsvoorraad aan te houden, kan men de kans op een voorraadtekort terugdringen.

We benadrukken nogmaals dat men bij de tweede methode veronderstelt dat de vraag tijdens de levertermijn normaal verdeeld is. We merken op dat het gebruik van een verdelingsfunctie normaal gezien theoretisch of empirisch dient bewezen te worden. Hiertegenover staat dat het onderzoek naar, en de evaluatie van de verdelingsfunctie van de vraag tijdens de levertermijn technisch gezien vrij complex is. Vandaar dat men vaak in de literatuur automatisch een normale verdeling als verdelingsfunctie vooropstelt.

Uiteraard dient er een kost geassocieerd te worden met deze drie types van voorraad, we noemen deze de voorraadkost. In de volgende paragrafen gaan we de vijf samenstellende elementen van deze voorraadkost toelichten. We beginnen bij de **interestkosten** om daarna verder te gaan met de **verzekeringskosten**, **magazijnkosten**, **materiaalbehandelingskosten** en **ontwaardingskosten**.

2.4.3 : Interestkosten

Aangezien men niet in staat is om de geïnvesteerde middelen in de voorraad te beleggen of te gebruiken voor een alternatieve investering, ontstaat er een opportuiniteitskost. Deze noemen wij de verdorven interestkost. Om de waarde van deze kost te bepalen, dienen wij de markt interestvoet op jaarbasis te vermenigvuldigen met de monetaire waarde van de aangehouden voorraad en de aanhoudsduur van de voorraad (uitgedrukt in jaren). De marktinterest welke gebruikt wordt om deze

kost te berekenen, dient de reële interestvoet te zijn. Aangezien de reële interestvoet gelijk is aan de nominale interestvoet vermindert met de inflatie, zal de interestkost per euro voorraad afhankelijk zijn van de marktcondities. We bespreken nu kort de interestkostfuncties van de verschillende voorraadtypes.

We leiden nu de totale **interestkostfunctie af van de in transit voorraad** die ontstaat tijdens het transport. Omdat de interestkost mede afhankelijk is van de duur van aanhoud van de voorraad, zal deze een tijdsafhankelijk kost zijn. We dienen de reële interestvoet te vermenigvuldigen met enerzijds de waarde van de vracht, welke overeenkomt met de waarde van de voorraad, en anderzijds met de transportduur in jaren, welke op zijn beurt overeenkomt met de voorraadduur (Baumol et al., 1970, p. 417). We verkrijgen aldus de onderstaande formule.

$$\text{Interestkost} = \text{reële interestvoet} \times \text{waarde van de vracht} \times \text{transportduur in jaren}$$

We kunnen de interestkost van de voorraad tijdens het transport ook uitdrukken in functie van de gemiddelde snelheid van de gebruikte modus en het aantal kilometers van het transporttraject. Hierdoor transformeren we de formule van een tijdsafhankelijke uitdrukking naar een kilometersafhankelijke uitdrukking. Hoewel deze transformatie nu nog overbodig lijkt, zullen we in hoofdstuk vier en vijf aantonen dat deze cruciaal is bij de afleiding van de verschillende haalbaarheidsmodellen. Hieronder geven we de formule weer van interestkost van de voorraad tijdens het transport per tonkm in functie van de gemiddelde snelheid van de modus en het aantal kilometers van het traject.

$$\frac{\text{Interestkost}}{Q_{\text{kilometer}} \times Q_{\text{ton}}} = \text{interestvoet} \times \text{waarde goederen per ton} \times Q_{\text{ton}} \times \frac{Q_{\text{kilometer}}}{\text{gemiddelde snelheid}} \\ \times \frac{1}{8760} \times \frac{1}{Q_{\text{kilometer}} \times Q_{\text{ton}}}$$

Symbool	Beschrijving
$Q_{\text{kilometer}}$	Het aantal af te leggen kilometers
Q_{ton}	Het aantal te transporteren ton

Na een simpele vereenvoudiging bekomen we de volgende formule.

$$\text{Interestkost per tonkm} = \text{reële interestvoet} \times \text{waarde per ton} \times \frac{1}{\text{gemiddelde snelheid} \times 8760}$$

We leiden nu **de interestkostenfunctie van de cyclusvoorraad** af. We kunnen twee gevallen onderscheiden.

- Er is enkel een cyclusvoorraad aanwezig bij de ontvangende onderneming.
- Er is zowel een cyclusvoorraad bij de verzendende als ontvangende onderneming.

In het eerste geval zal de gemiddelde cyclusvoorraad gelijk zijn aan de helft van de vaste bestelhoeveelheid. Hierbij zijn we wel van de veronderstelling uitgegaan dat het verbruiksritme constant en uniform verdeeld is en dat de levertermijn constant is. In het tweede geval zal de totale gemiddelde cyclusvoorraad twee keer zo groot zijn als in het eerste geval: de gemiddelde cyclusvoorraad is gelijk aan de volledige bestelhoeveelheid. We kunnen de totale interestkost voor de cyclusvoorraad bereken door de monetaire waarde van de gemiddelde voorraad te vermenigvuldigen met de reële interestvoet. We bekomen voor het eerste en tweede geval respectievelijk de volgende functies.

$$\text{Interestkost cyclische voorraad} = \frac{\text{bestelhoeveelheid in ton}}{2} \times \text{reële interestvoet} \times \text{waarde per ton}$$

$$\text{Interestkost cyclische voorraad} = \text{bestelhoeveelheid in ton} \times \text{reële interestvoet} \times \text{waarde per ton}$$

Indien we deze kost willen uitdrukken per ton, bekomen we de volgende uitdrukkingen.

$$\text{Interestkost cyclische voorraad} = \frac{\text{waarde bestelhoeveelheid} \times \text{reële interestvoet}}{2 \times (\text{totale bestelhoeveelheid in ton per jaar})}$$

$$\text{Interestkost cyclische voorraad} = \frac{\text{waarde bestelhoeveelheid} \times \text{reële interestvoet}}{(\text{totale bestelhoeveelheid in ton per jaar})}$$

Aangezien de voorraadkost van de veiligheidsvoorraad behoort tot de kosten van een voorraadtekort, zal de **interestkost van de veiligheidsvoorraad** in deze paragraaf niet behandeld worden. We verwijzen dan ook naar paragraaf 2.5.

2.4.4 : Verzekeringskosten

Hoe veilig goederen ook opgeslagen worden in een onderneming, men kan nooit alle risico's elimineren. Er blijft met andere woorden steeds een netto veiligheidsrisico bestaan. Een onderneming kan dit inperken door zich te verzekeren tegen brand en diefstal. Indien de verzekeringspremie die de onderneming moet betalen medebepaald wordt door de hoeveelheid opgeslagen goederen, dan dient

men deze premie te integreren in de voorraadkost. Men kan dit verwezenlijken door bijvoorbeeld de jaarlijkse verzekeringspremie te delen door het gemiddeld aantal opgeslagen goederen.

Uiteraard lopen de goederen tijdens het transport ook risico's. Indien de onderneming zich verzekert voor dit risico, dient men de betaalde premie te verrekenen in de voorraadkost tijdens het transport. Deze verzekeringspremie kan een aanzienlijk percentage vertegenwoordigen van de voorraadkost. Dit kunnen we ondermeer afleiden uit de crisis in de transportsector in de VS in het jaar 2000 welke mede veroorzaakt werd door een stijging in de verzekeringspremies van vrachtwagens (Schulz, J., 2000).

Uiteraard zullen niet alle modi onderhevig zijn aan dezelfde risico's. Vandaar dat de verzekeringskosten onderling sterk kunnen verschillen. Zo blijkt ondermeer uit cijfers van de Europese Unie dat het risico op ongevallen in de binnenvaart aanzienlijk lager is dan in het wegvervoer. (Maibach et al., 2007, p.49)

Indien een onderneming een risico loopt, maar bewust kiest om zich hiervoor niet te verzekeren, dan dient men nog steeds het risico te verrekenen in de voorraadkost. Uiteraard is dit voor een onderneming geen makkelijke opgave.

2.4.5 : Magazijnkosten

Indien de vervoergebruiker niet beschikt over een eigen magazijn, zal hij gebruik dienen te maken van een door hem gehuurd magazijn. Uiteraard dient de vervoergebruiker hiervoor een vergoeding te betalen. Hoeveel deze vergoeding bedraagt zal mede bepaald worden door de ruimte die de vervoergebruiker met zijn goederen inneemt. Uiteraard dient deze kost verrekend te worden in de voorraadkost. Men kan dit door bijvoorbeeld de prijs per bezette vierkante meter te delen door het aantal vierkante meter dat gemiddeld één goed in beslag neemt, aldus bekomt men de magazijnkost per goed.

In het geval dat de vervoergebruiker wel beschikt over een eigen magazijn, zal er nog steeds de noodzaak zijn om de geassocieerde kosten door te rekenen in de voorraadkost. Onder geassocieerde kosten van een magazijn verstaan we ondermeer interestafbetalingen, verwarming, afschrijving, verlichting en onderhoud. Door al deze kosten te delen door de gemiddelde aanwezige voorraad, bekomen we een magazijnkost tarief per goed.

Elke transportmodus kan aanzien worden als een bewegend magazijn. Vandaar dat men de kosten van de containers dient te verrekenen in de voorraadkost. Mogelijke kosten kunnen zijn de huur, afschrijving of herstel van containers. We kunnen deze kost ook uitdrukken per goed dat getransporteerd wordt. Hierbij delen we de bovenvermelde kosten door het gemiddeld aantal goederen in de container.

2.4.6 : Materiaalbehandelingskosten

Dit zijn de kosten die gemaakt worden voor de behandeling van goederen in opslag.

2.4.7 : Ontwaardingkosten

Naast het risico op diefstal en brand, dient men nog rekening te houden met de mogelijkheid van ontwaarding van goederen. Deze kan zowel economisch als fysisch van aard zijn. De economische ontwaardingskosten zijn goederenspecifiek. Hiermee bedoelen we dat deze kosten sterk afhankelijk zijn van het soort goederen. Zo kunnen we aannemen dat goederen met een korte levenscyclus een hogere economische ontwaarding kennen dan goederen met een zeer lange levenscyclus. De kosten van de ontwaarding zullen dus in het eerste geval veel hoger liggen dan in het tweede geval. Een voorbeeld van een goed dat een grote ontwaardingkost kent is de 'central processing unit' van een computer. Bakstenen op hun beurt zijn een voorbeeld van goederen die een lage ontwaardingkost hebben. Deze kosten kunnen zwaar doorwegen in de totale voorraadkost. Zo vermeldde Trunick (2004) in zijn artikel 'How to beat the high costs of shipping' dat in 2003 in de VS 68 procent van de voorraadkosten veroorzaakt worden door verzekering-, ontwaarding- en afschrijvingskosten.

Tot slot vermelden we dat er zich ook positieve herwaarderingen kunnen voordoen tijdens de opslag en transport. Deze toename in waarde kan ondermeer veroorzaakt worden door een plotse toename in de prijs van de opgeslagen goederen. In deze situatie kan men opteren om het positief effect al dan niet te verrekenen in de voorraadkost.

Ter afsluiting van de paragraaf over voorraadkosten, geven we hieronder een samenvattende tabel over de verschillende kostenelementen.

Samenstelling voorraadkost	
<i>Kostenelement</i>	<i>Beschrijving</i>
Interestkosten	Verdorven interesten door voorraadinvestering
Verzekeringskosten	Kosten tengevolge van veiligheidsrisico
Magazijnkosten	Huur en overheadkosten van gebruikte magazijnen
Materiaalbehandelingskosten	Kosten voor behandeling van goederen in opslag
Ontwaardingkosten	Kosten van ontwaarding van goederen

Tabel 2.2 : Overzicht van de samenstellende delen van de voorraadkost

2.5 : Kosten van voorraadtekort

Wanneer de voorraad van een bepaald goed tijdelijk uitgeput is, zal elk order met betrekking op dit product niet onmiddellijk uitgevoerd kunnen worden. Ofwel zal men met de uitvoering van het order dienen te wachten tot op het ogenblik dat het goed weer voorradig is, of men moet het order afwijzen. Uiteraard zal een dergelijke situatie extra kosten genereren: we noemen deze de kosten van een voorraadtekort (Chase et al.,2006,p. 590). Ze bestaan ondermeer uit de tijdelijke staking van de bediening van klanten, het stilvallen van machines, vertraging in het productieproces, het negatief effect op het imago, etc.

Aangezien deze kost een grote invloed kan hebben op de totale logistieke kostprijs van het transport, dienen we deze zo goed mogelijk in te schatten. De directe bepaling van de kostprijs van één voorraadtekort is in de meeste gevallen haast onmogelijk wegens de complexiteit van de kosten. Vandaar dat we er hier voor opteren voor deze kost op een indirecte manier te berekenen. In plaats van de directe tekortkosten te berekenen gaan we de extra voorraadkosten uitrekenen die nodig zijn om mogelijke tekorten te vermijden. Deze kosten komen overeen met de kosten van de veiligheidsvoorraad. We berekenen deze op een analoge manier als die van de cyclus voorraad en de voorraad tijdens het transport. We vermenigvuldigen de gemiddelde waarde van de veiligheidsvoorraad op jaarbasis met de reële markt interestvoet. De voorraadkost van de veiligheidsvoorraad is dan een indirecte indicatie van de kost van een voorraadtekort (Chase et al., 2006, p. 599-601).

2.6 : Verpakkingskosten

De meeste goederen die dienen getransporteerd te worden, moeten eerst verpakt worden. De verpakking dient onder andere om de goederen te beschermen tijdens het vervoer en om de stapelbaarheid te verbeteren. De gebruikte verpakking kan ook de overslagtijd van de goederen in grote mate beïnvloeden. De vervoergebruiker kan opteren voor verschillende soorten modi. Elke modi heeft zijn specifieke transportrisico's en laadcapaciteit. Naar gelang het type modus dat gebruikt wordt en het type goed dat men transporteert, zal men andere verpakkingstechnieken toepassen. Vandaar dat de verpakkingskosten afhankelijk zullen zijn van de gebruikte modus en het soort goed. Zo zal bijvoorbeeld het bulk- of tankvervoer een goedkopere verpakking vereisen dan het stukvervoer in colli. Verschillen in verpakkingsvoorschriften kunnen soms aanleiding geven tot een lagere verpakkingskost voor bepaalde modi (Blauwens et al.,2001, p. 263).

2.7 : Orderbehandeling- en administratiekosten

We gaan deze twee kostencomponenten samenvoegen en behandelen als één enkele kostprijs per gemaakte verzending. Naarmate het aantal verzendingen toeneemt, zal logischerwijs de totale kostprijs toenemen. Deze twee kostenelementen spelen in het voordeel van modi met grote laadcapaciteiten: uitgaande van een vaste jaarlijkse vraag naar een bepaald goed, zullen er minder verzendingen noodzakelijk zijn als de vervoergebruiker kiest voor een modus met een grote laadcapaciteit dan één met een kleinere laadcapaciteit. De orderbehandeling- en administratiekosten per verzending zullen naast de voorraad- en transportkost een belangrijke invloed hebben op de verzendkwantiteit.

We dienen ter afsluiting van deze paragraaf wel te vermelden dat sinds de grootschalige automatisering en computerisering en de opkomst van het internet, de impact van de orderbehandeling- en administratiekosten op de totale logistieke kost aanzienlijk is gedaald.

2.8 : Instelkosten

Wanneer een onderneming produceert met een 'batch shop' systeem, zal men voor elke batch een aantal instellingen dienen te overlopen. De kosten die hiermee geassocieerd worden noemen we de instelkosten (Chase et al., 2006, p. 210). Deze kosten dienen gedragen te worden door de producten die in de batch gecreëerd worden. Wanneer men produceert in korte reeksen (kleine batch), zal dit leiden tot hoge instelkosten per product. Indien men echter beslist om in langere reeksen te produceren, dan zal de instelkost per product aanzienlijk lager zijn. Aangezien de keuze van de grootte van de batch medebepaald wordt door leveringskwantiteit, zullen de transport- en voorraadbeslissingen een mogelijke invloed zijn op de instelkosten. Het transport in grote partijen kan dus mogelijk de instelkosten per product doen dalen. Uiteraard zal de cyclus voorraadkost in dit laatste geval wel toenemen. Een afweging tussen de instelkosten en de voorraadkosten is dus gewenst (Blauwens et al. 2001, p. 264).

2.9 : Kosten van klantenservice

Een belangrijk onderdeel van de kwaliteit van de goederen en diensten die een onderneming aanbiedt is de betrouwbaarheid. Onder betrouwbaarheid verstaan we in deze context de zekerheid van het tijdstip van levering. Dit kan een beweegreden voor ondernemingen zijn om te kiezen voor eigen vervoer of het aantal beroepsvervoerders waar ze gebruik van maken te beperken of uit te breiden.

Naast betrouwbaarheid zijn er ook andere elementen die het serviceniveau bepalen. Deze zijn ondermeer: flexibiliteit, frequentie, imago, veiligheid en andere strategische elementen. (Blauwens et

al. 2001, p. 264) Uiteraard zullen deze kwaliteitsattributen moeilijk kunnen gewaardeerd worden in monetaire termen. Een mogelijke oplossing hiertoe is het werken met gewichten. Hierbij kennen we verschillende gewichten toe aan zowel de kwalitatieve als kwantitatieve componenten. Bij elk vervoersalternatief waarderen we dan de verschillende componenten. Aldus verkrijgt men een totaalscore voor elke vervoersalternatief.

2.10 : Kosten van vestigingsplaats

De plaats waar een onderneming zich vestigt heeft een grote impact op de totale logistieke kosten. Vandaar dat over deze beslissing niet te licht mag overgegaan worden. Men dient de optimale locatie te vinden door alle kosten en baten van locaties te vergelijken met elkaar en daarenboven rekening te houden met tal van voorwaarden en beperkingen. De locatie van een onderneming kan een grote invloed hebben op de beslissing van de vervoergebruiker betreffende welke modus gebruikt zal worden. Zo kan bijvoorbeeld de aanwezigheid van tolheffingen in de omgeving van de onderneming er voor zorgen dat de vervoergebruiker gebruikt maakt van het spoorvervoer in plaats van het wegvervoer om zo deze tolheffingen te vermijden.

Vooraleer we aanvangen met de volgende paragraaf, geven we bij wijze van samenvatting de volgende tabel weer.

Samenvatting logistieke kostenelementen		
Type kostelement	Beschrijving	Paragraaf
Transportkosten	De directe kost voor het transport (tijd- en kilometerkosten)	2.2
Goederenbehandelingskosten	Deze ontstaan bij het laden, lossen en overslaan van goederen	2.3
Voorraadkosten	Kosten van het aanhouden van de cyclus- en 'in-transit'-voorraad	2.4
Kosten van voorraadtekort	Kosten van het aanhouden van de veiligheidsvoorraad	2.5
Verpakkingskosten	Kosten voor het verpakken van kosten	2.6
Orderbehandeling-en administratiekosten	De kost voor het aanmaken en verwerken van bestellingen	2.7
Instelkosten	De totale batch instelkosten	2.8
Kosten van klantenservice	Kosten ivm betrouwbaarheid, flexibiliteit, regelmaat en strategische elementen	2.9
Kosten van vestigingsplaats	Plaatsafhankelijke kosten voor het transport	2.10

Tabel 2.3 : Samenvattende weergave van de logistieke kostenelementen

2.11 : Kostenanalyse voor de haalbaarheidsmodellen van het multimodaal vervoer

In deze paragraaf construeren en analyseren we de kostenfuncties van het unimodaal en multimodaal vervoer. Hiertoe zullen we de hierboven besproken logistieke kostencomponenten gebruiken. Het doel is zo realistisch mogelijke kostenfuncties te ontwikkelen van zowel het unimodaal als multimodaal vervoer. Deze zullen gebruikt worden als het economisch vergelijkingscriterium bij de afleiding en constructie van de haalbaarheidsmodellen van het multimodaal vervoer, welke besproken worden in de hoofdstukken vier, vijf en zes. Deze modellen zullen op een grafische manier de gebieden weergeven waarbinnen specifieke transporttrajecten voordeliger zijn dan andere transportalternatieven.

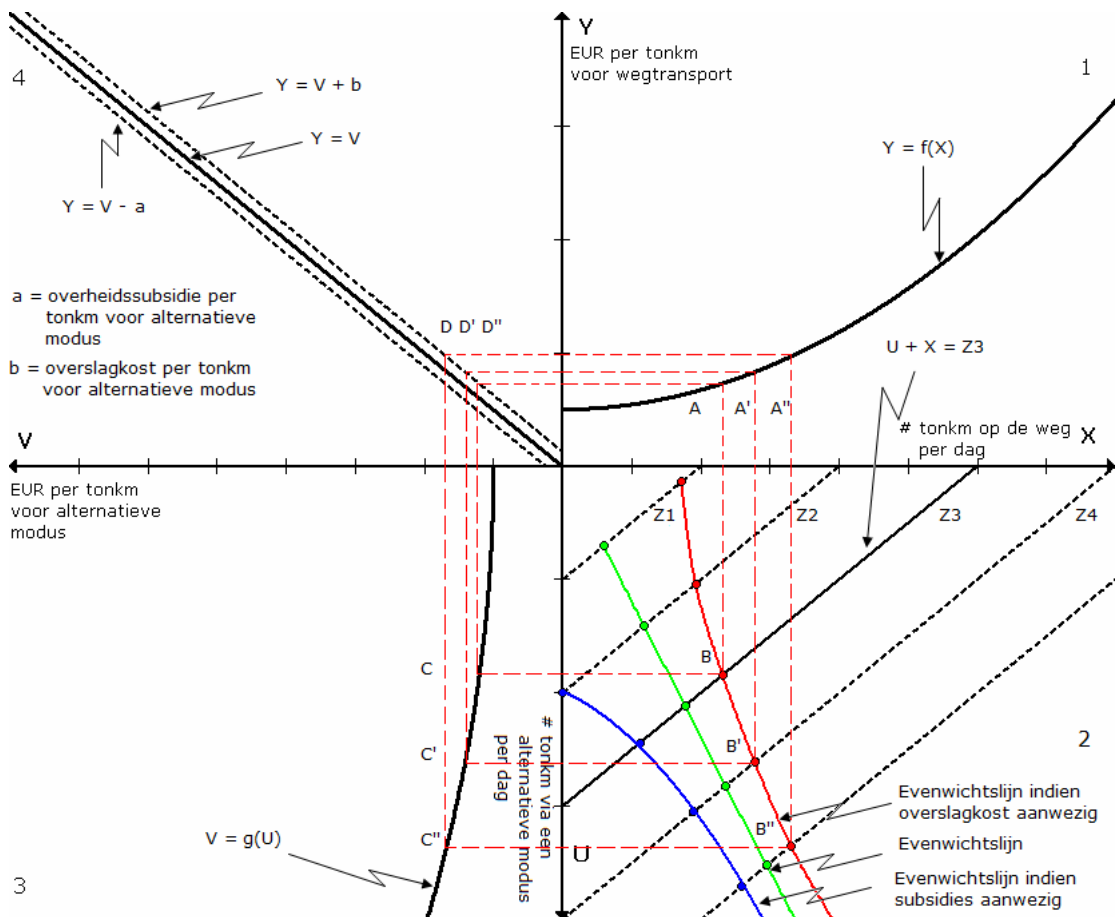
Zoals we reeds vermeld hebben in hoofdstuk 1, wordt de spoorweg- en binnenvaartmarkt in België, en meer algemeen in Europa, gekarakteriseerd door een infrastructurele onderbezetting. Het wegtransport heeft, vergeleken met de alternatieve modi, een te groot aandeel in het totaal transport. Het gevolg is dan ook dat het wegennet gekarakteriseerd wordt door congestie en andere problemen. Het is mogelijk om een deel van het wegtransport te substitueren door alternatieve modi. Naarmate men meer en meer gebruik maakt van deze alternatieve modi, zal de overcapaciteit geleidelijk verdwijnen. Voor elk niveau van de totale transportvraag voor een specifiek traject, zal er een punt bestaan waarvoor het relatieve marktaandeel van elke modus optimaal is. Eenmaal dit evenwichtspunt bereikt, is er geen beweegreden meer om verder wegtransport te substitueren voor een specifiek gecombineerd transport of visa versa. Dit komt doordat in het evenwichtspunt de totale marginale kost per tonkm voor beide transportalternatieven gewaagd zijn aan elkaar. Dit evenwichtspunt zal enkel wijzigen indien er zich een verschuiving van de vraag voordoet of een verandering in de infrastructuur. We stellen dit mechanisme op een grafische wijze voor in figuur 2.3.

Figuur 2.3 bestaat uit vier onderdelen aangeduid met een cijfer.

- Het *eerste deel* geeft de relatie weer tussen de relatieve drukte op de weg (X), uitgedrukt in tonkm per dag, en de marginale kost per tonkm voor het wegtransport (Y). Deze relatie is waarschijnlijk meer dan rechtevenredig. Des te drukker het wordt op een bepaald wegtraject, des te hoger de marginale kost per tonkm zal zijn. Deze stijging wordt voornamelijk veroorzaakt door de toename van de congestieproblemen. In de onderstaande figuur wordt deze relatie weergegeven door de functie $Y=f(X)$.
- Het *tweede deel* geeft de relatie weer tussen de relatieve drukte op de infrastructuur van een alternatieve transportmodus (U), bijvoorbeeld binnenvaart, en de relatieve drukte op de weg (X). Zowel X als U wordt uitgedrukt in het aantal tonkm per dag. De logica hierachter is de volgende: des te groter de relatieve drukte op de weg, des te lager de relatieve drukte op de infrastructuur van een alternatieve transportmodus. Voor elk specifiek tijdstip veronderstellen we dat de som van de drukte op de weg en op de infrastructuur van de alternatieve modi

constant is. Deze constante stemt overeen met het totaal aantal tonkm dat er per dag getransporteerd wordt over het specifiek traject. Naarmate de vraag wijzigt, zal deze constante veranderen. In deze analyse wordt de relatie tussen X en U voor elk niveau van het totaal aantal tonkm per dag weergegeven door een rechte lijnige curve. In de onderstaande figuur geven we vier dergelijke curven weer. Deze weerspiegelen vier verschillende niveaus van het totaal aantal tonkm per dag, namelijk Z_1 , Z_2 , Z_3 en Z_4 . Des te groter het aantal tonkm per dag, des te verder de curve verwijderd zal zijn van de oorsprong. Elk punt van een dergelijke curve, geeft een andere relatieve modale verdeling weer van het totaal aantal tonkm per dag. De blauwe, groene en rode curven, zijn de langetermijn evenwichtslijnen en worden pas later besproken.

- *Het derde onderdeel* geeft de relatie weer tussen de marginale kost per tonkm voor een alternatieve modus (V) en de drukte op de gebruikte verkeersinfrastructuur (U). Des te drukker het wordt, des te hoger de marginale kost per tonkm zal zijn. We verwachten echter dat de kosten minder snel stijgen in functie van het aantal tonkm per dag, dan in het geval bij het wegtransport. Dit heeft voornamelijk te maken met de aard van de infrastructuur en de capaciteit van de transportmodus. In de onderstaande figuur wordt deze relatie weergegeven door de functie $V=g(U)$.
- Het *vierde* en laatste onderdeel vergelijkt de marginale kosten per tonkm van het wegtransport met die van de alternatieve modus. We veronderstellen dat de relatieve modale verdeling van het totaal aantal tonkm per dag optimaal is, wanneer de hieruit volgende marginale kost per tonkm van beide alternatieven gelijk zijn aan elkaar. Grafisch kunnen we deze conditie weergeven door een 45°-lijn in het vierde kwadrant die door de oorsprong loopt. Deze curve wordt weergegeven door de volle zwarte lijn in onderstaande figuur en heeft de functie $Y = V$. In het vierde kwadrant vinden we ook twee zwarte gestippelde curven terug, welke evenwijdig lopen met 45°-lijn. De bovenste van de twee curven, weerspiegelt dezelfde conditie als de 45°-lijn maar houdt rekening met de noodzakelijke overslagkosten van de alternatieve modus. Deze overslagkosten worden weergegeven door de parameter 'b' en worden uitgedrukt in EUR per tonkm. De functie voor deze curve is $Y = V + b$. De laagste van de twee gestippelde curven, geeft ook dezelfde conditie weer als de 45°-lijn, maar houdt hierbij ook rekening met de toegekende subsidies. Deze subsidies worden uitgedrukt in EUR per tonkm en worden weergegeven door de parameter 'a'. De functie voor deze curve is $Y = V - a$. In het geval dat er zowel subsidies als overslagkosten aanwezig zijn bij een alternatieve modus, dient men enkel het netto-effect per tonkm te introduceren.



Figuur 2.3 : Voorstelling van het korte- en langetermijn evenwicht van de modale verdeling van het transport voor een bepaald traject. Indien de snijpunten van het horizontaal lijnstuk uit A en het verticale lijnstuk uit C met één specifieke 45°-lijn in het vierde kwadrant samenvallen, dan is het evenwicht tussen het wegtransport en een alternatieve modus bereikt. De keuze van welke 45°-lijn is afhankelijk van de aan- of afwezigheid van subsidies en overslagkosten. Bij het kortetermijn optimum verkrijgen we een gesloten rechthoek indien we de punten A en C verbinden met elkaar. Indien de snijpunten niet overeenkomen dan is het kortetermijn evenwichtspunt nog niet bereikt. Het langetermijn evenwicht wordt weergegeven door de evenwichtslijn in het tweede kwadrant. Deze curve is de verzameling van alle korte termijn optima en is in functie van het totaal aantal tonkm dat er getransporteerd wordt per dag. Elke 45°-lijn heeft zijn evenwichtslijn. In het bovenstaande voorbeeld komt de blauwe evenwichtslijn overeen met $Y=V-a$, de groene met $Y=V$ en de rode met $Y=V-b$.

Hierboven hebben we reeds de vier kwadranten afzonderlijk uitgelegd. In deze alinea lichten we toe hoe deze vier delen verbonden zijn met elkaar, en gezamenlijk de korte- en langetermijn optimale modale verdeling bepalen. Zoals we reeds vermeld hebben, veronderstellen we dat de optimale verdeling van het totaal aantal tonkm per dag bereikt is, als de marginale kost per tonkm van beide transportalternatieven gelijk zijn aan elkaar. Op kortetermijn zal het totaal aantal tonkm per dag constant zijn. Vandaar dat er op kortetermijn slechts één curve geldig is in het tweede kwartaal. Elk punt van deze curve, geeft een andere relatieve modale verdeling weer van het totaal aantal tonkm per dag. We veronderstellen gemakkelijheidshalve dat de totaal aantal tonkm per dag gelijk is aan Z3. Voor deze hoeveelheid zal er slechts één combinatie van weg- en alternatief transport zijn waarbij de marginale kost per tonkm van beide alternatieven gelijk zijn aan elkaar. Elke andere combinatie leid tot een relatieve over- en onderbezetting van de transportinfrastructures. We kunnen nagaan of een specifieke combinatie al dan niet optimaal is door de volgende procedure te volgen: we gaan voor

de specifieke combinatie na hoeveel tonkm er per dag getransporteerd wordt via het wegtraject. In ons voorbeeld komt dit overeen met het punt A. Vervolgens kunnen we op basis van de relatie in het tweede kwadrant, namelijk $X + U = Z3$, nagaan hoeveel tonkm er per dag getransporteerd wordt via de alternatieve transportmodus. Dit is punt C in de bovenstaande figuur. Aangezien we de marginale kost per tonkm van beide alternatieven moeten vergelijken met elkaar, dienen we een horizontale en verticale lijn te trekken vanuit respectievelijk het punt A en punt C naar één van de drie 45°-lijnen. In ons voorbeeld is dit $Y = V + b$, aangezien we rekening houden met de overslagkosten. Enkel indien de snijpunten van de horizontale en verticale lijn met de relevante 45°-lijn samenvallen in één punt, zal het optimale punt bereikt zijn. We verkrijgen aldus een gesloten rechthoek. In het bovenstaand voorbeeld bekomen we een dergelijke gesloten rechthoek: de modale verdeling van het totaal aantal tonkm per dag ($Z3$) is optimaal. Indien de snijpunten van de horizontale en verticale lijn met de relevante 45°-lijn niet samenvallen in één punt en men aldus geen gesloten rechthoek bekomt, is de relatieve modale verdeling niet optimaal. Het belang van de transportmodus met de hoogste marginale kost per tonkm moet dalen, terwijl het belang van de andere modus dient te stijgen. Indien op langere termijn het totaal aantal tonkm per dag toeneemt, dan dient men dezelfde procedure te doorlopen om het nieuwe optimum te berekenen. In het bovenstaande voorbeeld hebben we het optimum ook berekend voor $Z2$ en $Z4$. We kunnen het langetermijn optimum weergeven als een curve in functie van het totaal aantal tonkm per dag. Deze curve is een verzameling van alle kortetermijn optima voor de verschillende niveaus van het totaal aantal tonkm per dag. We noemen zo een curve een evenwichtslijn. Aangezien het kortetermijn optimum afhankelijk is van de gekozen 45°-lijn, zal elke 45°-lijn zijn eigen langetermijn evenwichtslijn hebben. In de bovenstaande figuur worden de evenwichtslijnen weergegeven van de drie verschillende 45°-lijnen. De blauwe evenwichtslijn komt overeen met $Y = V - a$, de groene met $Y = V$ en de rode evenwichtslijn met $Y = V + b$.

Het hierboven uitgelegd principe maakt duidelijk dat de marginale kost per ton van de transportmodi mede bepaald worden door de relatieve drukte op de relevante verkeersinfrastructuren. Aangezien deze relatieve verdeling een gegeven is voor elke geconsidereerde periode, dient de marginale kost per ton van elke modus een constante te zijn binnen deze periode voor een specifiek transport. We veronderstellen met andere woorden dat de transportgebruiker niet in staat is wezenlijke invloed uit te oefenen op de relatieve modale verdeling van een bepaald traject. We moeten hierbij echter wel vermelden dat de overheid mogelijk wel een invloed kan hebben op deze verdeling en door haar acties en maatregelen een modale shift teweeg kan brengen. Aangezien de analytische modellen de haalbaarheidsgebieden berekenen voor elk alternatief voor een specifiek tijdstip, kunnen we veronderstellen dat de marginale kosten per tonkm van de verschillende transportmodi constant zijn voor een specifiek traject. Vandaar dat we in deze eindverhandeling zowel de marginale kilometerafhankelijke kost per tonkm als de marginale kilometeronafhankelijke kost per ton van elke transportmodus aanzien als een constante in functie van de tijd en afstand.

Vooraleer we starten met de afleiding van de kostenfuncties, dienen we eerst nog een paar zaken duidelijk te maken. Aangezien we de kostenfuncties willen gebruiken als het economisch vergelijkingscriterium bij de afleiding van de haalbaarheidsmodellen, zullen we de kostenfuncties

moeten definiëren in termen van deze modellen. Zo zullen we alle kostenelementen moeten onderverdelen in kilometerafhankelijke kosten en constante kosten. Dit betekent dat alle tijdsafhankelijke kosten dienen omgevormd te worden tot kilometerafhankelijk, en dit op basis van gemiddelde snelheden. De kilometerafhankelijke kosten dienen uitgedrukt te worden in EUR/tonkm en de constante kosten in EUR/ton.

Verder gaan we uit van de volgende veronderstellingen: er zal slechts één cyclusvoorraad zijn, de vraag tijdens de levertijd is approximatief normaalverdeeld en de levertijd is gelijk aan de transporttijd.

We beginnen met het bespreken van de kostenfunctie van het unimodaal vervoer om uiteindelijk te eindigen met deze van het multimodaal vervoer.

2.11.1 : Kostenfunctie unimodaal vervoer

Onder het unimodaal vervoer verstaan we het rechtsreeks transport van goederen van vertrekpunt A naar aankomstpunt B uitgeoefend door één transportmodus. Deze analyse is geldig voor elke keuze van transportmodus, zolang er geen voor- of natransport aan te pas komt. We gaan bij deze analyse uit van het transport en opslag van goederen van een specifiek type, welke wij y noemen. Deze concrete invulling dient om de formules te vereenvoudigen.

We beginnen bij het weergeven van de algemene uitdrukking van de logistieke transportkosten. Daarna gaan we stapsgewijs alle verschillende elementen overlopen. We eindigen deze paragraaf met de weergave van de bekomen kostenfunctie.

We kunnen de totale logistieke kost van het unimodaal transport, als volgt algemeen weergeven.

$$f(x) = \overbrace{\left(\text{transportkosten} + \text{in transit voorraadkost} + \text{veiligheidsvoorraad kost} \right)}^{\text{kilometerafhankelijk}} \times \text{aantal kilometer} \\ + \text{cyclusvoorraadkosten} + \text{verpakking kosten} + \text{orderhandeling en administratiekosten} \\ + \text{instelkosten} + \text{goederenbehandelingskosten} + \text{kosten vestigings plaats}$$

Transportkosten

Indien de vervoergebruiker kiest voor een professionele vervoerder, dan zal de transportkost overeenstemmen met de door de vervoergebruiker betaalde prijs. Indien de vervoergebruiker zelf het transport uitvoert, zullen de transportkosten gelijk zijn aan de rechtstreeks veroorzaakte kosten binnen de organisatie van de vervoersgebruiker. We merken wel op dat deze kosten medeaafhankelijk zullen zijn van de bezettingsgraad van de gebruikte transportmodus.

In transit voorraadkost

Tijdens het transport worden goederen opgeslagen in de modus zelf. Deze tijdelijke opslag dienen we als een voorraad te beschouwen. Aangezien deze kost tijdsafhankelijk is, dienen we ze te transformeren naar een kilometerafhankelijke kost. De voorraadkost per tonkm bestaat uit de optelsom van vijf elementen, zoals besproken in paragraaf 2.4. We bespreken hieronder de formule van elk van deze vijf elementen afzonderlijk.

Interestkost

We geven hieronder de functie weer die kan gebruikt worden bij het berekenen van de interestkost tijdens het transport uitgedrukt in EUR/tonkm.

$$\text{Interestkost} = \text{reële interestvoet} \times \text{waarde per ton goed } y \times \frac{1}{\text{gemiddelde snelheid} \times 8760}$$

Verzekeringskosten

Indien de onderneming zich verzekert tegen transportrisico's, dient men de betaalde premie te verrekenen. Als de onderneming dit risico niet verzekert, dan dient men nog steeds het naakt verzekeringrisico te verrekenen. De verzekeringskosten per tonkm kunnen als volgt berekend worden.

$$\text{verzekeringkost} = \frac{\text{betaalde verzekeringspremie}}{\text{aantal km verzekerd traject} \times \text{aantal ton verzekerde goederen}}$$

Indien de beroepsvervoerder de verzekering van de goederen op zich neemt, dan zal de verzekeringskost geïntegreerd zijn in de transportkost.

Magazijnkosten

Elke transportmodus kan aanzien worden als een bewegend magazijn. Vandaar dat men de kosten per tonkm van de containers dient te verrekenen in de voorraadkost.

$$\text{Magazijnkosten} = \frac{\text{huur of afschrijvingskosten van container voor specifiek traject}}{\text{aantal km traject} \times \text{aantal ton goederen in één container}}$$

Indien men gebruik maakt van een beroepsvervoerder, zullen deze kosten geïntegreerd zijn in de transportkost.

Goederenbehandelingskosten

Deze zijn niet van toepassing bij de voorraad tijdens het transport.

Ontwaardingkosten

Hierbij kan men gebruik maken van historische ontwaardingkosten. Men kan op basis hiervan schattingen maken over de mogelijke toekomstige ontwaarding. Ofwel maakt men gebruik van de actuele ontwaardingkosten. Het nadeel van deze laatste methode is dat men slecht de kosten kent nadat het transport zich heeft voorgedaan. Wij geven een formule weer die gebruikt maakt van de eerste techniek. De ontwaardingkosten per tonkm worden als volgt berekend:

$$\text{ontwaardingkosten} = \frac{\overbrace{\text{totale ontwaardingkosten vorig jaar met zelfde modus}}^{\text{Goed type } y}}{\underbrace{\text{aantal ton getransporteerde goederen zelfde modus} \times \text{aantal km}}_{\text{Goed type } y}}$$

Indien we deze vijf componenten optellen, verkrijgen we de totale kost van de in transit voorraad uitgedrukt in EUR/tonkm

Kost veiligheidsvoorraad

De kost van de veiligheidsvoorraad wordt op een analoge manier berekend als die van de voorraadkost tijdens het transport. De veiligheidsvoorraad voor het goed type y wordt bepaald door de standaardafwijking van de verdeling van de vraag tijdens de levertermijn. Aangezien deze standaardafwijking medebepaald wordt door de levertijd, welke op zijn beurt beïnvloed wordt door de af te leggen afstand, zal de veiligheidsvoorraad, in tegenstelling tot de in transit voorraad, kilometerafhankelijk zijn. We geven deze deductie mathematisch weer.

$$\text{Veiligheidsvoorraad} = K \times \sigma_L$$

$$\text{Veiligheidsvoorraad} = K \times \sqrt{t \sigma_D^2 + D^2 \times \sigma_t^2}$$

$$\text{Veiligheidsvoorraad} = K \times \sqrt{\left[\frac{\text{aantal kilometer}}{\text{gemiddelde snelheid} \times 24} \right] \sigma^2_D + D^2 \times \sigma^2_t}$$

Met (t) gelijk aan de gemiddelde levertijd, σ^2_t gelijk aan de variantie van de levertijd, D als de gemiddeld verwachte vraag en σ^2_D als de variantie van de vraag per dag. Aangezien de bovenstaande formule weergeeft hoeveel ton veiligheidsvoorraad men dient aan te houden uitgaande van een bepaalde bestelhoeveelheid, delen we deze formule door het aantal kilometers en de totale jaarlijkse vraag uitgedrukt in ton. Zo bekomen we de onderstaande formule die het aantal ton veiligheidsvoorraad van het goed type y weergeeft per tonkm. We zullen deze uitdrukking gebruiken om de voorraadkost te berekenen. We dienen echter op te merken dat de veiligheidsvoorraad per tonkm niet constant is in functie van het aantal kilometer. Des te groter het aantal kilometer des te kleiner deze ratio wordt. Dit betekent dat de totale veiligheidsvoorraad minder dan evenredig zal stijgen bij een toename van de te overbruggen afstand. In de hoofdstukken vier, vijf en zes zullen we de veiligheidsvoorraad per tonkm berekenen op basis van het aantal kilometer van het totale traject. Het gevolg is dat de veiligheidsvoorraad niet volledig overeenstemt met de werkelijkheid buiten in het eindpunt. Deze methode is echter realistischer dan het andere alternatief, namelijk de totale veiligheidsvoorraad constant houden.

$$\frac{\text{Veiligheidsvoorraad}}{\text{aantal kilometer} \times \text{jaarlijkse vraag in ton}} = K \times \frac{\sqrt{\left[\frac{\text{aantal kilometer}}{\text{gemiddelde snelheid} \times 24} \right] \sigma^2_D + D^2 \times \sigma^2_t}}{\text{aantal kilometer} \times \text{leveringshoeveelheid}}$$

Interestkost

De interestkost per tonkm die aangerekend dient te worden aan de veiligheidsvoorraad, kan op de onderstaande manier berekend worden.

$$\text{Interestkost} = \text{reële interestvoet} \times \text{waarde per ton} \times \text{veiligheidsvoorraad}_{\text{tonkm}}$$

Verzekeringskosten

Indien de verzekeringspremie die de onderneming moet betalen medebepaald wordt door de hoeveelheid opgeslagen goederen, dan dient men deze premie te integreren in de voorraadkost. We kunnen de verzekeringskost per tonkm als volgt berekenen.

$$\text{verzekeringskost} = \text{jaarlijkse verzekeringspremie per ton} \times \text{veiligheidsvoorraad}_{\text{tonkm}}$$

Magazijnkosten

Indien de vervoergebruiker niet beschikt over een eigen magazijn, zal hij gebruik dienen te maken van een door hem gehuurd magazijn. De magazijnkosten per tonkm bedragen dan:

$$\text{Magazijnkosten} = \text{huurprijs per ton opgeslagen goed} \times \text{veiligheidsvoorraad}_{\text{tonkm}}$$

In het geval dat de vervoergebruiker wel beschikt over een eigen magazijn, zal er nog steeds de noodzaak zijn om de geassocieerde kosten door te rekenen in de voorraadkost.

$$\text{Magazijnkosten} = \text{magazijnkosten per ton opgeslagen goed} \times \text{veiligheidsvoorraad}_{\text{tonkm}}$$

Goederenbehandelingskosten

De goederenbehandelingskosten per tonkm kunnen op onderstaande wijze berekend worden.

$$\text{Behandelingskosten} = \text{behandelingskosten per ton opgeslagen goed} \times \text{veiligheidsvoorraad}_{\text{tonkm}}$$

Ontwaardingkosten

Bij de berekening van deze kosten per tonkm kan men gebruik maken van de historische ontwaardingkosten. Op basis hiervan kan men dan schattingen maken over de mogelijke toekomstige ontwaarding. Een andere mogelijkheid is het gebruik maken van de actuele ontwaardingkosten. Wij geven een formule weer die gebruik maakt van de eerste techniek.

$$\text{ontwaardingkosten} = \text{ontwaardingkosten per ton vorig jaar} \times \text{veiligheidsvoorraad}_{\text{tonkm}}$$

Indien we deze vijf componenten optellen, verkrijgen we de totale kost van de veiligheidsvoorraad uitgedrukt in EUR/tonkm.

Kosten van de cyclusvoorraad

De kosten die het gevolg zijn van het aanhouden van de cyclusvoorraad, kunnen op een analoge manier weergegeven worden zoals in de vorige paragraaf. Deze kosten zijn niet kilometerafhankelijk,

in tegenstelling tot die van de veiligheids- en transportvoorraad. Vandaar dat deze kost zal uitgedrukt worden in EUR/ton.

Interestkost

De interestkost per ton kan op onderstaande wijze berekend worden.

$$\text{Interestkost} = \text{reële interestvoet} \times \frac{\text{waarde van de cyclusvoorraad type y}}{\text{totaal getransporteerde goederen type y}}$$

Verzekeringskosten

Indien de verzekeringspremie die de onderneming moet betalen mede bepaald wordt door de hoeveelheid opgeslagen goederen, dan dient men deze premie te integreren in de voorraadkost. De verzekeringskost per ton worden als volgt berekend:

$$\text{verzekeringkost} = \frac{\text{jaarlijkse verzekeringspremie voor opslag type y}}{\text{totaal getransporteerde goederen type y}}$$

Magazijnkosten

Indien de vervoergebruiker niet beschikt over een eigen magazijn, zal hij gebruik dienen te maken van een door hem gehuurd magazijn. De magazijnkosten per ton bedragen dan:

$$\text{Magazijnkosten} = \frac{\text{huurprijs voor het gebruikte deel magazijn}}{\text{totaal getransporteerde goederen type y}}$$

In het geval dat de vervoergebruiker wel beschikt over een eigen magazijn, zal er nog steeds de noodzaak zijn om de geassocieerde kosten door te rekenen in de voorraadkost.

$$\text{Magazijnkosten} = \frac{\text{overheadkosten van gebruikte deel magazijn}}{\text{totaal getransporteerde goederen type y}}$$

Goederenbehandelingskosten

De goederenbehandelingskosten per ton kunnen we als volgt berekenen:

$$\text{Goederenbehandelingskosten} = \frac{\text{totaal behandelingskosten van voorraad type y}}{\text{totaal getransporteerde goederen type y}}$$

Ontwaardingkosten

Hieronder geven we een formule weer die de ontwaardingkosten berekent per ton op basis van de historische data.

$$\text{ontwaardingkosten} = \frac{\text{totale ontwaardingkosten van de goederen type } y}{\text{totaal getransporteerde goederen type } y}$$

Indien we deze vijf componenten optellen, verkrijgen we de totale kost van de cyclusvoorraad uitgedrukt in EUR/ton.

Verpakkingskosten

Naargelang de gebruikte modus en het type te transporteren goed, zullen de verpakkingskosten verschillen. Deze kosten zijn noch tijd- nog kilometerafhankelijk. We kunnen deze kosten per ton berekenen op de hier onderstaande wijze.

$$\text{verpakkingskosten} = \frac{\text{totale verpakkingskosten van goed } y \text{ per verzending}}{\text{aantal ton goederen type } y \text{ per verzending}}$$

Orderhandeling- en administratiekosten

We gaan deze twee kostencomponenten samenvoegen en behandelen als één enkele kostprijs per gemaakte verzending. Aangezien deze kosten niet tijds- en niet kilometerafhankelijk zijn, zullen we ze uitdrukken per EUR/ton.

$$\text{order en administratiekosten} = \frac{\text{totale order en administratiekosten per jaar voor type } y}{\text{aantal zendingen per jaar} \times \text{aantal ton type } y \text{ per zending}}$$

Instelkosten

Wanneer een onderneming produceert met een 'batch shop' systeem, zal men voor elke batch een aantal instellingen dienen te overlopen. De kosten die hiermee geassocieerd worden noemen we de instelkosten (Chase et al., 2006, p. 210). Deze kosten, welke we uitdrukken per ton, dienen gedragen te worden door de producten die in de batch gecreëerd worden.

$$\text{instelkosten} = \frac{\text{instelkosten per batch}}{\text{aantal ton goederen per batch}}$$

Goederenbehandelingskosten

Dit zijn de kosten per ton die ontstaan wanneer goederen worden geladen, gelost en overgeslagen. Bij het unimodaal transport zullen de goederen éénmaal ingeladen en éénmaal uitgeladen worden, er is geen nood aan overslag. Deze kosten zullen gedragen worden door de in- en uitgeladen goederen.

$$\text{goederenbehandelingskosten} = \frac{\text{goederenbehandelings kosten van één transport}}{\text{aantal ton vervoerde goederen per transport}}$$

Kosten vestigingsplaats

Aangezien de kostenverdeelsleutel afhankelijk is van het type vestigingsplaatskost, kunnen we geen algemene formule afleiden. We dienen in iedere situatie de relevante verdeelsleutel van de vestigingsplaatskost te achterhalen. Op basis van deze verdeelsleutel kan men dan de kosten toewijzen aan de goederen.

2.11.2 : kostenfunctie multimodaal vervoer

Onder het multimodaal vervoer verstaan we het transport van goederen van het vertrekpunt A naar het aankomstpunt B waarbij men gebruik maakt van twee of meerdere verschillende modi. Traditioneel splitst men het multimodaal traject op in drie subtrajecten, namelijk het voortransport, hoofdtransport en natransport. We zullen bij de bespreking van de kostenfunctie deze drieledige structuur aanhouden.

Aangezien elke modus dezelfde algemene logistieke kostenfunctie heeft, spitsen wij ons in deze paragraaf toe op het toelichten van verschillen tussen de kostenfunctie van het unimodaal en het multimodaal transport.

Kostenfunctie van het voor- en natransport

Zowel de kostenfunctie van het voor- als het natransport zijn analoog aan deze van het unimodaal vervoer met de uitzondering op cyclusvoorraadkosten, goederenbehandelingskosten, verpakkingskosten, order- en administratiekosten en instelkosten.

Al deze kosten, met uitzondering van de goederenbehandelingskosten, dienen niet opgenomen te worden in de logistieke kostenfuncties. De reden hiertoe is dat deze kosten veroorzaakt worden door

het gehele transport, en niet door elk subtraject afzonderlijk. Om dubbelstellingen te vermijden, voegen we deze kosten enkel toe aan de logistieke kostenfunctie van het hoofdtransport.

In het unimodaal vervoer werden de goederenbehandelingskosten veroorzaakt door het in- en uitladen van de goederen. In het voor- en natransport bij containertransport dienen de goederen enkel respectievelijk in- of uitgeladen te worden aangezien de goederen overgeslagen worden aan de respectievelijk begin- of eindterminal van het hoofdtransport. De kosten van deze overslag worden geïntegreerd in de logistieke kostenfunctie van het hoofdtransport als goederenbehandelingskosten. Bij het stuk- en bulktransport dienen de goederen wel uitgeladen en ingeladen te worden in respectievelijk het voor- en natransport.

Kostenfunctie van het hoofdtransport

De kostenstructuur van het hoofdtransport is identiek aan die van het unimodaal transport. Enkel de kosten van de goederenbehandeling bestaan uit de overslagkosten in de begin- en eindterminal van het hoofdtransport en niet uit de in- en uitlaadkosten van de goederen. De totale logistieke kost van het multimodaal vervoer is uiteraard de optelling van de kostenfunctie van het voor- en natransport met die van het hoofdtransport.

2.12 : Invloed van gemiddelde snelheid en gemiddelde vracht per levering op de totale logistieke kosten.

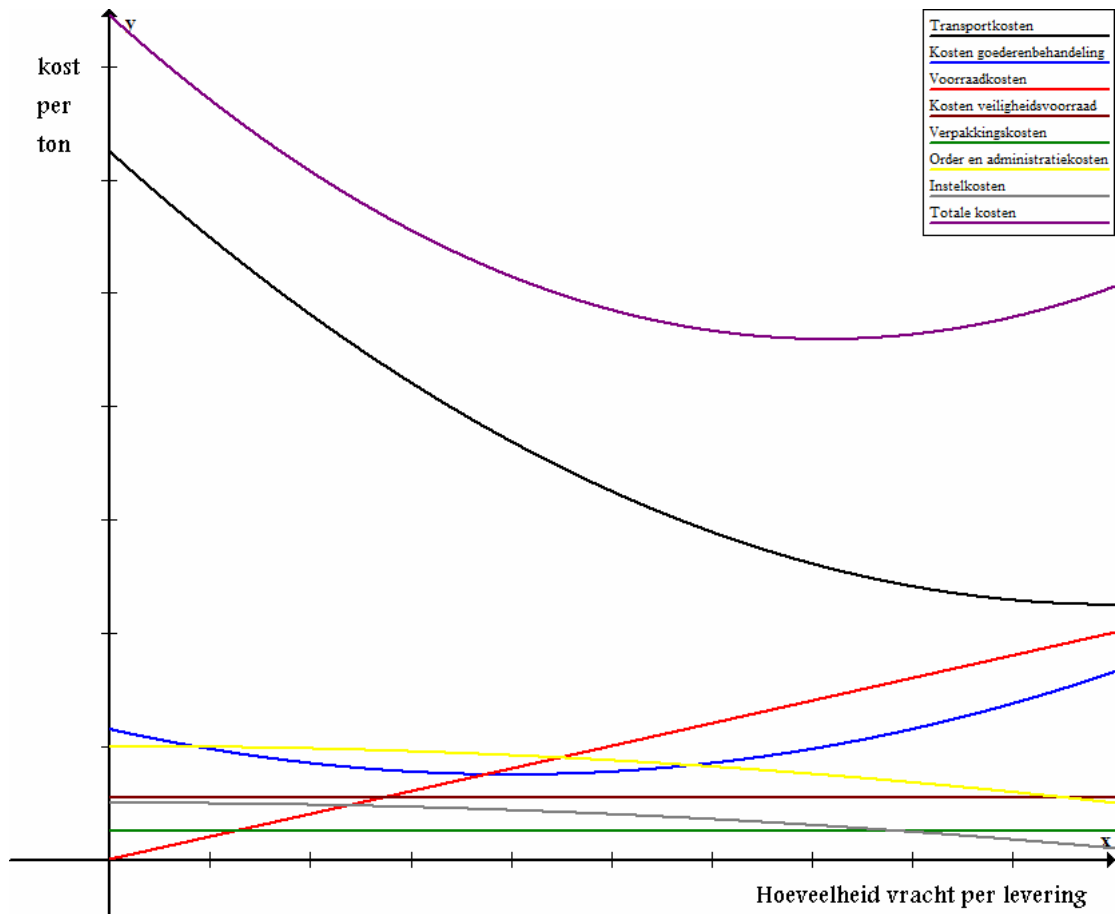
We gaan eerst nagaan wat **de invloed van de gemiddelde vracht per levering** is op de totale logistieke kosten uitgedrukt per ton goed. We bespreken kort de invloed op de voornaamste kostenelementen.

- **Transportkosten per ton:** des te meer ton goederen er in éénmaal getransporteerd worden, des te groter zullen de totale transportkosten zijn. Deze stijging in de kost is echter minder dan rechtevenredig met de toename van de tonnage. Vandaar dat de transportkost per ton, in functie van de hoeveelheid vracht per levering, een exponentieel dalend verloop zal kennen (Botton, 1993, p 67).
- **Goederenbehandelingskosten per ton:** we kunnen hier het principe van schaalvoor- en nadelen toepassen. De schaalvergroting van de goederenbehandeling zal initieel leiden tot een daling van de kosten per ton. Vanaf een zekere omvang van goederenbehandeling zullen de schaalvoordelen uitgeput geraken en wordt men geconfronteerd met schaalnadelen. Deze zullen de goederenbehandelingskosten per ton doen stijgen. We dienen wel op te merken dat bij sommige modi er nooit schaalnadelen zullen optreden. Dit komt doordat de gemiddelde vracht per levering

waar de schaalnadelen beginnen, groter is dan de totale laadcapaciteit van de modus zelf.

- **Voorraadkosten per ton:** des te groter de vracht per levering, des te groter de cyclusvoorraad en de in transit voorraad. Uit de definitie en de formule van de cyclusvoorraad blijkt dat de kosten per ton van deze voorraad rechtevenredig toenemen met gemiddelde vracht per levering. De kost per ton van de voorraad tijdens het vervoer zal, zo blijkt uit de formule, constant blijven. Het gevolg is dan ook dat de totale voorraadkosten per ton rechtevenredig zullen toenemen met de gemiddelde vracht per levering.
- **Kosten veiligheidsvoorraad per ton:** de veiligheidsvoorraad wordt bepaald door P-waarde en de variatie van de vraag tijdens de levertermijn. Indien we veronderstellen dat de leadtime en de verdeling hiervan niet wijzigt, dan zal zowel de P-waarde als de variantie van de vraag tijdens de levertermijn niet beïnvloed worden door de gemiddelde vracht per levering. Aldus zal de kost per ton van de veiligheidsvoorraad constant blijven bij een toe- of afname van de gemiddelde vracht per levering.
- **Verpakkingskosten per ton:** we dienen een onderscheid te maken tussen stuk- en bulkgoederen. Aangezien stukgoederen meestal individueel of in colli verpakt worden, zal de verpakkingskost per ton constant zijn. Bij bulkgoederen zal de totale vracht één colli zijn. De kosten die gemaakt worden om de goederen goed en veilig te transporteren dienen gedeeld te worden door het aantal ton bulkgoederen. De verpakkingskosten per ton van bulkgoederen zal naar alle waarschijnlijkheid een dalend verloop kennen in functie van de gemiddelde vracht per levering.
- **Orderbehandeling- en administratiekosten per ton:** in deze analyse veronderstellen we dat er vaste jaarlijkse transportvraag aanwezig is. Een toename van de gemiddelde vracht per levering heeft dan als gevolg dat er minder verzendingen op jaarbasis nodig zijn. Naarmate het aantal verzendingen daalt, zal logischerwijs de totale orderbehandeling- en administratiekosten afnemen. We dienen deze kosten te delen door het totaal aantal vervoerde goederen om zo de kosten per ton te kennen. Hieruit blijkt dat de orderbehandeling- en administratiekosten per ton minder dan rechtevenredig dalen in functie van de gemiddelde vracht per levering.
- **Instelkosten per ton:** Deze kosten dienen gedragen te worden door de producten die in de batch gecreëerd worden. Wanneer men produceert in korte reeksen, zal dit leiden tot hoge instelkosten per product. Indien men echter beslist om in langere reeksen te produceren, dan zal de instelkost per product aanzienlijk lager zijn. Des te groter de gemiddelde vracht per levering, des te groter de reeks kan zijn en des te lager de instelkost per ton. Deze daling is minder dan rechtevenredig.

Hieronder geven we een figuur weer die de invloed van de gemiddelde vracht per levering op de hierboven besproken kostenelementen weergeeft. We dienen de lezer te waarschuwen dat de hoogte van de verschillende kostenelementen louter fictief zijn.



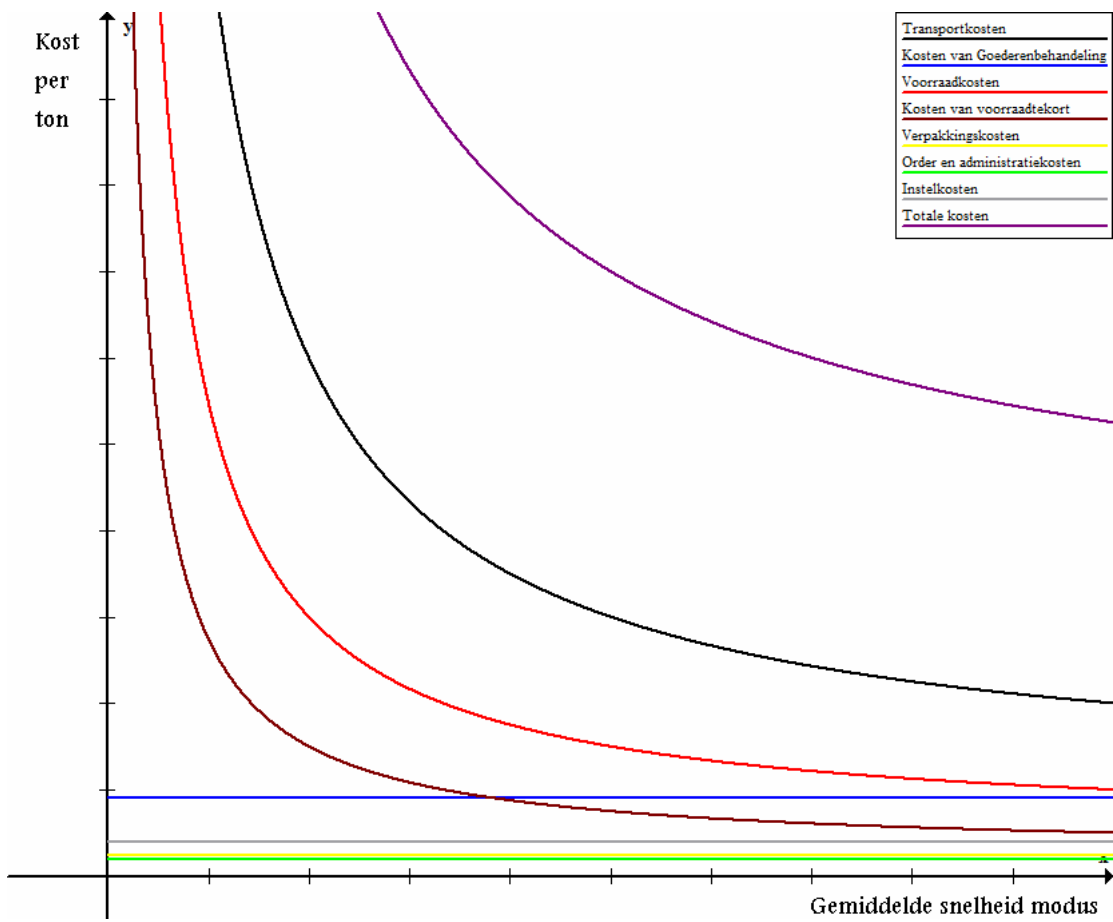
Figuur 2.4 : Invloed van de gemiddelde hoeveelheid vracht per levering op de logistieke kost per ton

We gaan nu na wat **de invloed van de gemiddelde snelheid van de modus** is op de totale logistieke kosten uitgedrukt per ton goed. Hummels (2001) toonde op basis van onderzoek aan dat de gemiddelde snelheid van het transport een grotere relatieve impact heeft op de totale logistieke transportkosten dan dat men zou verwachten op basis van de voorraadkosten. Hieronder bespreken we kort de invloed op de voornaamste logistieke kostenelementen.

- **Transportkosten per ton:** de transportkosten bestaan uit tijd- en kilometerafhankelijke kosten. Uiteraard zullen enkel de tijdafhankelijke kosten beïnvloed worden door de gemiddelde snelheid van de modus. Uit de formule van de transportkosten blijkt dat de kosten per ton eerst meer dan rechtevenredig en daarna minder dan rechtevenredig dalen bij een stijgende gemiddelde snelheid.
- **Goederenbehandelingskosten per ton:** de snelheid waarmee goederen getransporteerd worden zal geen invloed hebben op de goederenbehandelingskosten. Vandaar dat deze kosten per ton constant blijven in functie van de gemiddelde snelheid van de modus.

- **Voorraadkosten per ton:** des te groter de gemiddelde snelheid van een modus, des te kleiner de in transit voorraad. Uit de definitie en de formule van de kost van de voorraad tijdens het vervoer blijkt dat de afname van de kost per ton eerst meer- en later minder dan evenredig is ten opzichte van de toename in de gemiddelde snelheid van de modus.
- **Kosten veiligheidsvoorraad per ton:** de veiligheidsvoorraad wordt bepaald door P-waarde en de variantie van de vraag tijdens de levertermijn. Aangezien de levertermijn beïnvloed wordt door de gemiddelde snelheid van de modus, zal de veiligheidsvoorraad ook in functie zijn van de gemiddelde snelheid. Des te groter de gemiddelde snelheid, des te kleiner de veiligheidsvoorraad. Het gevolg is dat de kost van de veiligheidsvoorraad per ton een dalend verloop kent in functie van de gemiddelde snelheid. Deze daling zal, net zoals bij de transportkosten en de voorraadkosten per ton, eerst meer dan rechtevenredig en daarna minder dan rechtevenredig zijn in functie van de toename van de gemiddelde snelheid.
- **Verpakkingskosten per ton:** aangezien het type verpakking onafhankelijk is van de gemiddelde snelheid van de modus, zullen de verpakkingskosten per ton constant blijven. Deze conclusie is zowel geldig voor stuk- als voor massagoederen
- **Orderbehandeling- en administratiekosten per ton:** aangezien de gemiddelde snelheid van de modus geen invloed heeft op het aantal verzendingen, zullen de orderbehandeling- en administratiekosten per ton constant zijn
- **Instelkosten per ton:** Deze kosten dienen gedragen te worden door de producten die in de batch gecreëerd worden. Aangezien de gemiddelde snelheid van de modus geen invloed heeft op de batchgrootte, zullen deze kosten per ton constant blijven

Hieronder geven we een figuur weer die de invloed van de gemiddelde snelheid van de modus op de hierboven besproken kostenelementen weergeeft. We dienen de lezer te waarschuwen dat de hoogte van de verschillende kostenelementen louter fictief zijn. De conclusie echter dat de totale logistieke kost van een specifieke modus het laagste is wanneer hij zijn maximale gemiddelde snelheid bereikt, is wel geldig. We houden bij deze analyse wel geen rekening met de invloed van de gemiddelde snelheid op het brandstofverbruik en onderhoudskosten, aangezien dit modusspecifiek behandelt dient te worden. Het incorporeren van deze invloed kan de optimale gemiddelde snelheid doen dalen (Button, 1993, p.75).



Figuur 2.5 : Invloed van de gemiddelde snelheid van een specifieke modus op de totale logistieke kost per ton

Hoofdstuk 3 : Externe kosten van het transport

3.1 : Inleiding

Het vorige hoofdstuk beschreef de interne logistieke kostenstructuur van de vervoersgebruiker. Al deze kosten worden gedragen door de vervoersgebruiker en zijn klant of toeleverancier, afhankelijk van de positie van de eerste in het 'value network'. Bij het nemen van transportgerelateerde beslissingen zal de vervoersgebruiker zich baseren op deze interne logistieke kosten.

Vanuit onze dagdagelijkse ervaring met onze omgeving is het echter duidelijk dat er nog andere transportgerelateerde kosten zijn welke niet rechtstreeks gedragen worden door de vervoersgebruiker. Voorbeelden van dergelijke kosten zijn legio: de kosten van geluidsoverlast veroorzaakt door vrachtvliegtuigen tijdens het landen en opstijgen; de kosten van vervuiling bij het lozen van olie van schepen; de kosten van de milieuverloedering ten gevolge van de uitstoot van CO₂, CO, NO_x, SO₂ en dergelijke. Dit type van kosten noemen wij 'externe kosten'. Deze externaliteiten ontstaan wanneer de activiteiten of beslissingen van één bepaalde groep het welzijn en de welvaart van een andere groep (eventueel inclusief de eerste groep) beïnvloedt zonder hiervoor gecompenseerd te worden. Hoewel er ook externe voordelen bestaan, zullen we in dit hoofdstuk enkel de externe kosten bespreken aangezien deze laatste veel belangrijker zijn in de transportsector (Button, 1993). We dienen er echter wel op te wijzen dat er een wezenlijk verschil bestaat tussen de externe en milieukosten. De laatste geeft de werkelijke kost weer, die voortvloeit uit de menselijke belasting van het milieu. De externe kosten geven het deel weer van de milieukosten, welke nog niet geïnternaliseerd zijn.

Dit hoofdstuk bestaat uit twee delen. In het eerste deel structureren en beschrijven we de verschillende vormen van externe kosten die mogelijk veroorzaakt worden door het transport van goederen. Het opzet van dit hoofdstuk is om de lezer inzicht te geven in de verschillende types van externe kosten en hun waarderingsmethoden. In het tweede deel van dit hoofdstuk pogen we de verschillende hoofdtypen van externe kosten te modelleren zodat we het ecologisch, energetisch en sociaal-economisch vergelijkingscriterium kunnen creëren. Deze zullen later gebruiken bij het construeren van de verschillende haalbaarheidsmodellen. We zullen achtereenvolgend de totale ecologische kosten, de totale energetische kosten en de totale externe kosten gaan modelleren.

3.2 : Verschillende onderverdelingen van externe kosten

Gedurende de laatste vijftig jaar zijn er veel publicaties verschenen over het gecompliceerde concept van externe kosten. Hoewel het niet de bedoeling is om hier een overzicht te geven van de verschillende visies en classificaties omtrent externe kosten, zijn er toch twee belangrijke onderverdelingen die verdere uitleg behoeven. Het gaat hier om het onderscheid tussen enerzijds

geldelijke (pecuniary) en technologische externaliteiten en anderzijds vervuiling en congestie externaliteiten (Button, 1993).

3.2.1 : Geldelijke (pecuniary) en technologische externaliteiten

Het verschil tussen deze twee types van externaliteiten ligt in het feit dat bij het technologisch type de externaliteit zich voordoet in de productie of bij de consumptie waarbij als gevolg de productie- of nutsfunctie wijzigt. Dit zal echter niet het geval zijn bij het geldelijk type. Het volgende voorbeeld verduidelijkt het onderscheid: een nieuwe autosnelweg kan het aangename uitzicht van de inwoners van een wijk ernstig verstoren. Deze autosnelweg zal dus rechtstreeks de nutsfunctie van de lokale bewoners beïnvloeden. We spreken hier van een technologische externe kost. Indien deze autosnelweg er voor zorgt dat lokale ondernemingen minder goede zaken doen, dan zal het gereduceerde inkomen van deze ondernemingen een pecunaire externe kost zijn vermits het negatief effect indirect van aard is.

Aangezien het feit dat beide typen van externe kosten zich gelijktijdig voordoen, is het onderscheid tussen beide niet altijd even duidelijk. Het is echter van primordiaal belang dat we beide types onderscheiden van elkaar. De technologische externaliteiten zijn echte resource kosten waarmee men rekening zou dienen te houden bij het nemen van beleidsbeslissingen indien men een sociaal optimale oplossing beoogt. De pecunaire externaliteiten zijn geen resource kosten maar hebben wel belangrijke distributie implicaties. Het gevolg is dan ook dat pecunaire externaliteiten de totale netto voor- of nadelen niet wijzigen maar wel zorgen voor een herverdeling van deze laatste.

3.2.2 : Vervuiling en congestie externaliteiten

In conventionele welvaart theorieën worden er verscheidene categorieën van externaliteiten onderscheiden van elkaar. Rothenberg (1970) biedt een simpele dichotomie aan die van meer praktisch nut is in de transportcontext. Hij maakt onderscheid tussen twee vormen van externaliteiten die hij generische congestie noemt. De onderliggende gedachte is dat externe kosten veroorzaakt worden door de poging van 'agents' om een gemeenschappelijke dienst of goed, die niet voorzien wordt in discrete eenheden, te delen met elkaar. De aanwezigheid van andere gebruikers beïnvloedt de kwaliteit van de dienst of goed die ieder toegewezen krijgt. De generische congestie kan onderverdeeld worden in twee groepen, met name *pure vervuiling* en *pure congestie*.

Pure vervuiling doet zich voor wanneer er gebruikers aanwezig zijn die het medium (service of goed) gaan misbruiken: deze noemen wij de vervuilers. Naast deze vervuilers zijn er ook andere gebruikers die als het ware passieve slachtoffers zijn van het misbruik van het medium.

Pure congestie : hierbij veronderstellen we dat alle gebruikers het medium (service of goed) op een gelijkaardige manier aanwenden waarbij elke gebruiker de kwaliteit van de service of goed beschadigt zowel voor andere als voor zichzelf. De ratio van de eigen schade ten opzichte van de schade die de andere gebruikers ondervinden is voor alle gebruikers approximatief gelijk aan elkaar.

In dit hoofdstuk zullen we voornamelijk de dichotomie van Rothenberg gebruiken om de verschillende externaliteitsvormen te analyseren en te interpreteren. In het volgende onderdeel bespreken we de pure congestie externaliteiten die veroorzaakt worden door het transport van goederen en diensten.

3.3 : Transport en de omgeving : pure vervuilingkosten

3.3.1 : Algemeen

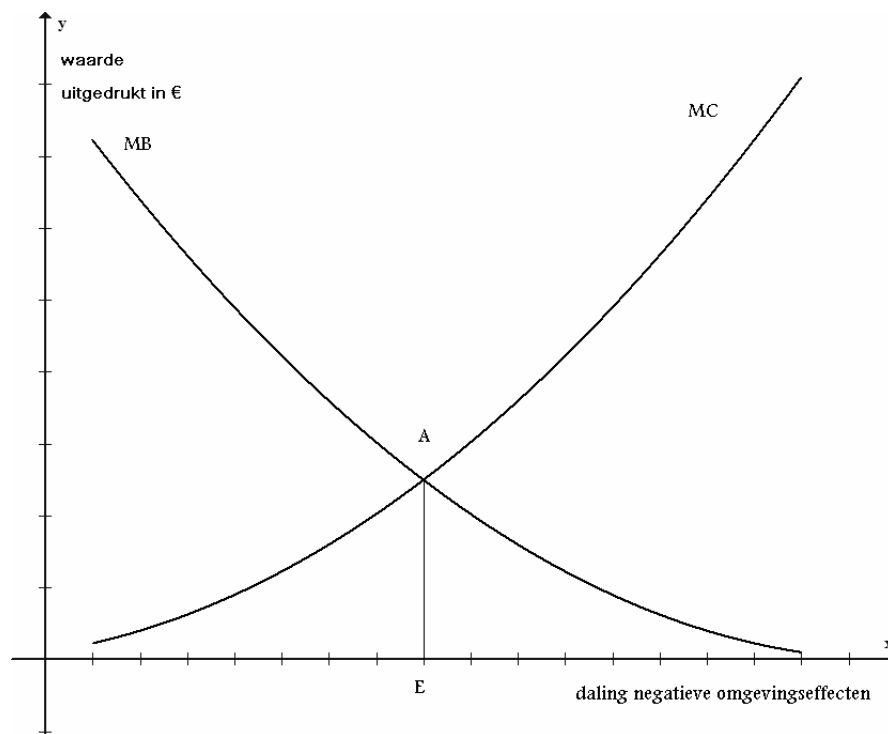
Volgens Button (1993) zal het transport van goederen en diensten op drie verschillende manieren een vervuilend effect hebben op de omgeving.

- Ten eerste zal het transport lokale omgevingskosten met zich mee brengen voor diegenen die werken, wonen of ontspannen in de nabijheid van belangrijke transportinfrastructuren. Deze kosten omvatten onder andere geluidsoverlast, visuele hinder en lokale luchtverontreiniging.
- Vervolgens zijn er ook grensoverschrijdende effecten, zoals bijvoorbeeld emissies die zure regen in de hand werken of maritieme lozingen die mogelijk een invloed hebben op gebieden ver verwijderd van de transportactiviteit zelf.
- Ten derde zal het transport van goederen en diensten, door ondermeer de uitstoot van CO₂, bijdragen tot het probleem van de opwarming van de aarde en de verdunning van de bovenste ozonlaag.

De meeste milieuactivisten pleiten voor een substantiële of totale reductie van deze negatieve omgevingseffecten. In de praktijk zou deze situatie niet overeenstemmen met de optimale sociaal-economische oplossing. De reden hiertoe is dat men te weinig of zelfs geen rekening houdt met de kosten die geassocieerd zijn met het verwijderen van deze negatieve omgevingseffecten. Deze kosten houden verband met de transportgebruiker. Deze personen halen duidelijk voordeel uit de mogelijkheid om goederen en diensten vrij te kunnen transporteren en verplaatsen. Indien er maatregelen genomen worden om bepaalde negatieve omgevingseffecten te reduceren, zullen deze meer dan waarschijnlijk het netto voordeel van de transportgebruikers doen dalen. In plaats van de omgevingseffecten volledig te verwijderen, kiezen economen ervoor om deze te optimaliseren. Aldus bekomt men het sociaal-economisch optimum.

We kunnen deze redenering ook grafisch voorstellen. We verwijzen hier naar onderstaande figuur 3.1. De verticale as beschrijft de monetaire waarde van zowel de kosten als voordelen van de vermindering van de negatieve omgevingseffecten. De horizontale as beschrijft de totale vermindering van deze negatieve effecten. De marginale kosten voor het verminderen van deze effecten (MC) gaan meer dan waarschijnlijk sterk stijgen bij een toenemende vermindering, met andere woorden de marginale kostencurve heeft een positieve ricocoëfficiënt. Dit kan ondermeer verklaard worden door het feit dat het steeds moeilijker wordt om de resterende negatieve omgevingseffecten verder te

verminderen. De marginale voordelen (MB) voor een bijkomende vermindering van deze negatieve effecten, zullen dalen naarmate er minder zijn. Het gevolg is dan ook dat, uitgaande van een gekende marginale kost- en voordeelcurve, er een duidelijk optimaal niveau van negatieve omgevingseffecten bestaat. Dit optimale punt wordt in figuur 3.1 weergegeven door E. Indien de negatieve omgevingseffecten zouden verminderd worden tot een niveau lager dan het optimum, dan zou het totale surplus van de samenleving dalen. Dit houdt in dat de samenleving in zijn geheel armer wordt. Dit wordt veroorzaakt doordat de marginale kosten van de vermindering hoger zijn dan de marginale voordelen van dezelfde vermindering.



Figuur 3.1 : Optimale negatieve omgevingseffecten. De MB curve geeft de marginale voordelen weer om één eenheid minder te vervuilen. De MC curve geeft de marginale kosten weer om één eenheid minder te vervuilen. Het optimale vervuilingniveau is in het punt A waar de MC en MB curve elkaar snijden.

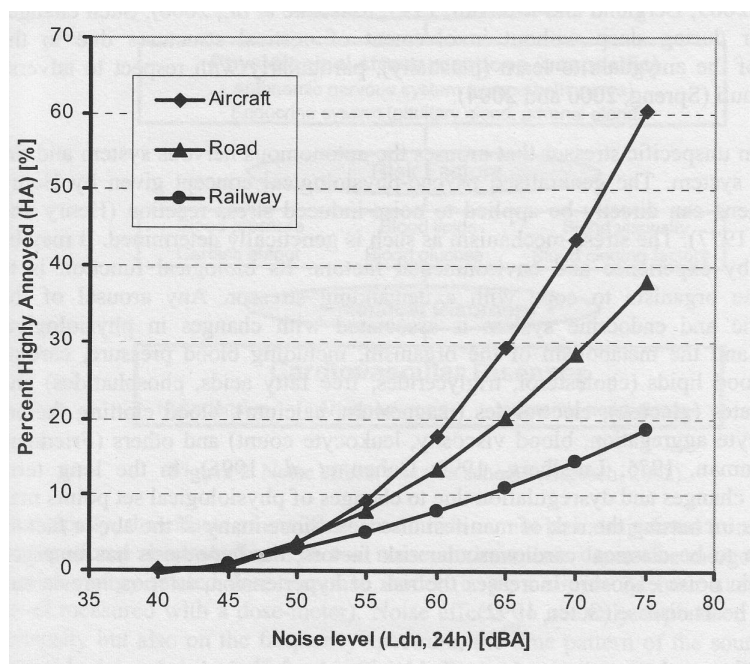
3.3.2 : Samenstellende onderdelen van de externe kosten

In deze paragraaf bespreken we de verschillende samenstellende onderdelen van de pure vervuilingkosten. We zullen nagaan wat hun negatief effect juist inhoudt, hoe het eventueel gemeten kan worden en wat hun orde van grootte is in Europa.

Geluidsoverlast

Geluidsoverlast heeft verschillende negatieve invloeden op de gezondheid en het welzijn van mensen. Volgens Nicolopoulou et al. (2005) beïnvloedt geluidsoverlast verschillende activiteiten, zoals ondermeer communicatie, slaap en relaxatie, en zal een belangrijke eigenschap zijn bij het verklaren van slaapproblemen en afwijkingen van het endocriene systeem. Daarenboven zal een langdurige blootstelling aan geluidsoverlast leiden tot psychologische en fysiologische afwijkingen. We denken hierbij ondermeer aan stress en vermoeidheid. Verder kan geluidsoverlast ook de aanleiding zijn tot cardiovasculaire ziekten (Button 1993).

Er zijn echter wel praktische problemen bij het meten van geluidsoverlast. Dit komt doordat de overlast afhankelijk zal zijn van zowel de intensiteit, de herhaling als de frequentie. Een mogelijke meetmethode die hiermee rekening houdt is de dB(A) meting. Hierbij zal men verschillende metingen uitvoeren waarbij elke meting een gewicht toegewezen krijgt op basis van de onaangenaamheid van het geluid. Deze laatste is gebaseerd op de frequentie en de herhaling. De metingen zelf weerspiegelen de intensiteit van het geluid. Men berekent zowel de dB(A) voor overdag als 's nachts. Men spreekt van erge geluidsoverlast vanaf een dB(A) van 65 en 55 voor respectievelijk overdag of 's nachts (Nicolopoulou, 2005, p. 10). We dienen wel op te merken dat de geluidsoverlast ook afhankelijk zal zijn van de modus die deze veroorzaakt. Figuur 3.2 geeft weer dat voor éénzelfde niveau van dB(A), vliegtuigen het meeste geluidsoverlast met zich meebrengen, vervolgens wegtransport en tenslotte het spoorvervoer. De reden waarom vliegtuigen meer overlast bezorgen dan het trein- of wegverkeer heeft voornamelijk te maken met de geluidsfrequentie.



Figuur 3.2 : weergave van de relatie percentage geïrriteerd met het geluidsniveau in dBA voor het wegtransport, luchtransport en spoortransport, Nicolopoulou (2005) p. 11

Hoewel de meetschalen zeer handig zijn in het schatten van geluidsoverlast, geven zij geen monetaire uitdrukking van de gerelateerde kosten hiervan. Deze gegevens zijn echter nodig indien we de

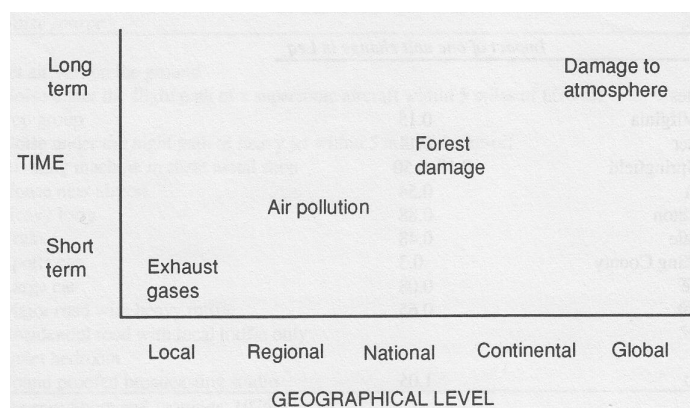
marginale voordeelcurve willen berekenen. Er zijn verschillende methodes die gebruikt kunnen worden om geluidsoverlast te waarderen. Een van de belangrijkste is het vergelijken van de eigendomprijzen in functie van de geluidsoverlast. Hierbij vergelijkt men de prijzen van gelijkaardige eigendommen. Deze eigendommen dienen zo identiek mogelijk te zijn op uitzondering van één punt na: de blootstelling aan geluidsoverlast. De bedoeling is de ceteris paribus wijziging van de prijs van de eigendommen na te gaan in functie van geluidsoverlast. Het verschil in prijs dient dan als indicatie van de kost van geluidsoverlast. We dienen echter wel op te merken dat deze methode moeilijk perfect te implementeren is, aangezien geluidsoverlast meestal gepaard gaat met andere vormen van overlast of met andere voordelen.

Het 'European Environment Agency' schat dat ongeveer 120 miljoen inwoners van de Europese Unie blootgesteld worden aan geluidsniveaus, veroorzaakt door het wegvervoer, boven de 55 dB(A). Een kleine 40 miljoen inwoners worden regelmatig geconfronteerd met geluidsniveaus van boven de 55 dB(A) veroorzaakt door het treinverkeer. Gemiddeld genomen worden er ongeveer 40 % van de inwoners van de EU regelmatig blootgesteld aan omgevingsgeluiden van minstens 55 dB(A). (Nicolopoulou et al., 2005, p.35-36)

Volgens P. Lammar en L. Hens (Nicolopoulou et al., 2005, p.199-222) is het wegtransport verantwoordelijk voor drie kwart van alle gevallen van geluidsoverlast veroorzaakt door het transport van goederen en diensten in Vlaanderen. Het luchttransport is verantwoordelijk voor 23.8 procent en het spoorvervoer voor 1.2 procent van de transportgerelateerde geluidsoverlast. In 2001 was het wegverkeer verantwoordelijk voor het blootstellen van 30 procent van de Vlaamse populatie aan geluidsniveaus van boven de 65 dB(A).

Atmosferische vervuiling

Naast geluidsoverlast zal het transport van goederen en diensten ook verantwoordelijk zijn voor de uitstoot van verscheidene gevaarlijke gassen. In relatieve termen is het transport een van de belangrijkste atmosferische vervuilers (Button, 1993). Het is wel belangrijk dat we in het achterhoofd houden dat de impact van de uitlaatgassen in functie is van tijd en ruimte. Zoals we in de onderstaande figuur 3.3 kunnen zien, is er sprake van een tijdkloof wanneer de impact van de uitlaatgassen zich op een ander niveau manifesteert. Des te hoger het niveau, des te meer de impact verbonden zal zijn met andere effecten en systemen die niet allemaal exclusief veroorzaakt worden door het transport. Op deze hogere niveaus vinden we dus een cocktail terug van transport- en niet transportgerelateerde emissies. Hieronder geven we systematisch de belangrijkste giftige gassen en stoffen weer die verband houden met het transport van goederen en diensten.



Figuur 3.3 : Weergave van tijds- en ruimteverdeling van uitlaatgassen, Button (1993) p.104

Emissies van brandstofadditieven

Om de prestaties van ontploffingsmotoren te verbeteren worden vaak additieven toegevoegd in brandstoffen. Het gevaar bestaat dat deze additieven giftig kunnen zijn voor de omgeving en vrij komen tijdens de verbranding. Een voorbeeld hiervan was de toevoeging van lood in bepaalde brandstoffen. Volgens Button is het transport in geïndustrialiseerde landen verantwoordelijk voor 50 procent van de totale looduitstoot. Deze situatie is in de laatste twintig jaar wel fel verbeterd mede dankzij het overschakelen naar loodvrij brandstoffen.

Koolstofdioxide emissies

Deze emissies worden veroorzaakt door de volledige verbranding van fossiele brandstoffen. Ze zijn een grote impact op zowel lokaal niveau als op wereldschaal. Dit komt voornamelijk door het feit dat CO₂ mee aan de basis ligt van het broeikaseffect en de opwarming van de aarde. De verantwoordelijkheid van de grote niet-natuurlijke hoeveelheden van CO₂ in de atmosfeer ligt voornamelijk bij de geïndustrialiseerde landen welke volgens Button (1993) goed zijn voor 80 procent van de totale niet-natuurlijke uitstoot. Ongeveer 15 procent van deze totale niet-natuurlijke CO₂ uitstoot wordt veroorzaakt door gemotoriseerde voertuigen. Dit cijfer kan oplopen tot zelfs 40 procent in bepaalde landen. Hoewel de te hoge CO₂ emissies duidelijk een grote impact heeft op onze gehele omgeving, zijn de CO₂ concentraties niet rechtsreeks schadelijk voor de mens.

Hoewel we overtuigd zijn dat CO₂ emissies een grote invloed hebben, is het zeer moeilijk om de exacte geografische impact en hun timing te voorspellen. Daarenboven zijn de langetermijneconomischegevolgen nog moeilijker in te schatten. Indien we in staat willen zijn om het sociaal-economisch optimum te bereiken, is het van primordiaal belang dat we de impact van de CO₂ emissies op onze natuurlijke omgeving en economische situatie kunnen inschatten.

In 1990 produceerde Vlaanderen ongeveer 83 Mton CO₂-eq. In 2001 bedroeg dit getal 93 megaton. Deze stijging is bijna volledig veroorzaakt door een toename in CO₂ emissies. Het verkeer en de

transportsector zijn voornamelijk verantwoordelijk voor deze toename in broeikasgassen. De contributie van deze sectoren tot de totale emissie van CO₂ en N₂O in Vlaanderen, bedroeg in 2001 respectievelijk 19,3 en 6,1 procent (Nicolopoulou, 2005, p. 201). Volgens de recentste cijfers van de Vlaamse milieumaatschappij was de transportsector in 2006 verantwoordelijk voor een uitstoot van 14,7 Mton CO₂, wat 28 procent meer is dan in 1990. Deze evolutie kunnen we waarnemen in tabel 3.1 en figuur 3.4. (VMM, 2007)

Stikstofemissies (NO_x)

Deze soort van emissies zijn voornamelijk een probleem wanneer ze gecombineerd worden met andere luchtvervuiling of in gebieden waar de inwoners lijden aan een slechte gezondheid. In het laatste geval kunnen de NO_x emissies leiden tot ademhalingsmoeilijkheden en een langdurige blootstelling kunnen resulteren in oedeem en emfysem. Op het grensoverschrijdend niveau zullen de NO_x emissies omgevormd worden tot salpeterzuur, dat in combinatie met SO₂ een belangrijk component vormt voor zure regen. Deze zure regen heeft een grote schadelijke invloed op het ecosysteem, voorbeelden hiervan zijn de uitdunning van de vispopulatie en de ontbossing. De transportsector is verantwoordelijk voor ongeveer 50 procent van de totale uitstoot van stikstofemissies. We dienen ook hier een schatting te maken van de emissie gerelateerde kosten om het sociaal-economisch optimum te bereiken.

Het verkeer over de weg is in Vlaanderen verantwoordelijk voor 52 procent van de totale emissies van stikstofemissies. In 2006 bedroeg de totale transportgerelateerde uitstoot van NO_x in Vlaanderen 78 kton. Dit is 26 procent lager dan de oorspronkelijke emissie in 1990. Vlaanderen voldoet aan de Europese richtlijn die een maximum waarde vooropstelt van 200 µg/m³ lucht (VMM, 2007, p. 102). Ook hier verwijzen we naar tabel 3.1 en figuur 3.4.

Koolstofmonoxide emissies (CO)

Koolstofmonoxide wordt gegenereerd door een onvolledige verbranding van fossiele brandstoffen. Het kan een schadelijk effect hebben op de gezondheid aangezien het gas de zuurstofopname door de rode bloedlichaampjes doet afnemen. Dit kan op zijn beurt aanleiding geven tot een verhoogde morbiditeit en kan de vruchtbaarheid negatief beïnvloeden. Button (1993) stelt ook dat een te hoge CO concentratie zal leiden tot een verlaagde werknemersproductiviteit en concentratiestoornissen. De uitstoot van CO vormt voornamelijk problemen in verstedelijkte gebieden omdat de CO bindingen aangaat met andere vervuilende gassen om zo fotochemische smog te vormen en oppervlakte ozon (O₃).

Indien we tabel 3.1 en figuur 3.4 analyseren, merken we onmiddellijk op dat de uitstoot van CO in Vlaanderen drastisch gedaald is over de periode 1990-2006. Hoewel we in 1990 nog ruim 403 kton uitstootten, is die waarde gedaald tot 123,5 kton in 2006. Dit is een daling van 69 procent. (VMM, 2007)

Zwavedioxide emissies (SO₂)

Deze emissies zijn kleurloos maar hebben een zeer sterke geur. Deze kunnen aanleiding geven tot bronchitis en andere ziekten van het ademhalingsstelsel. Daarenboven zal zwavedioxide reageren met stikstofdioxide emissies om zo een belangrijk onderdeel te vormen van zure regen die, zoals reeds vermeld, een grote negatieve impact heeft op het ecosysteem.

De transportgerelateerde uitstoot van zwavedioxide ten opzichte van de totale emissie bedroeg in 2000 twee procent in Vlaanderen. Dit kwam overeen met 3 272 ton. In 2006 was de transportsector enkel verantwoordelijk voor een uitstoot van 410 ton SO₂. Dit is een daling van 95 procent ten opzichte van de oorspronkelijke uitstoot in 1990. Het lage relatieve percentage is mede te danken aan de Europese invoering van een maximum hoeveelheid aan SO₂ in diesel en andere brandstoffen (VMM, 2007, p. 102-104). Net zoals bij de stikstofdioxides voldoet Vlaanderen aan de Europese richtlijn welke een maximum waarde vooropstelt van 80 microgram per kubieke meter lucht (Nicolopoulou et al., 2005, p. 202).

Vluchtige organische stoffen (VOS)

Deze stoffen bestaan uit een grote variëteit van koolwaterstoffen en andere substanties, zoals onder meer methaan, ethyleenoxide, benzeen, etc. Zij worden voornamelijk veroorzaakt door de onvolledige verbranding van fossiele brandstoffen, hoewel het verdampen van brandstof in een brandstoftank en de carburator steeds belangrijker worden bij de uitstoot van koolwaterstoffen.

Wanneer deze stoffen gecombineerd worden met NO_x in zonlicht, zullen de koolwaterstoffen en de meeste VOS's een laag niveau ozon genereren, welke het belangrijkste element is van fotochemische smog. Deze schadelijke gassen veroorzaken ademhalingsproblemen, oogirritaties en sommige onderdelen kunnen zelfs carcinogeen en mogelijk mutageen zijn. Ook hier dienen we weer tot een schatting te komen van de kosten van de uitstoot van deze substanties, om aldus het sociaal-economisch optimum te berekenen.

Nicolopoulou et al. (2005) stellen vast dat de VOS emissies stelselmatig dalen in Vlaanderen. Zo is onder andere de gemiddelde benzeenconcentratie gedaald van 3,9 µg/m³ in 1990 naar 1 µg/m³ in 2001. De totale uitstoot van de niet methaan vluchtige organische stoffen bedroeg in 2006 ongeveer 16 380 ton. Ten opzichte van de emissies in 1990 is dit een daling van 71 procent (VMM, 2007, p.102). Ook hier verwijzen we naar tabel 3.1 en figuur 3.4.

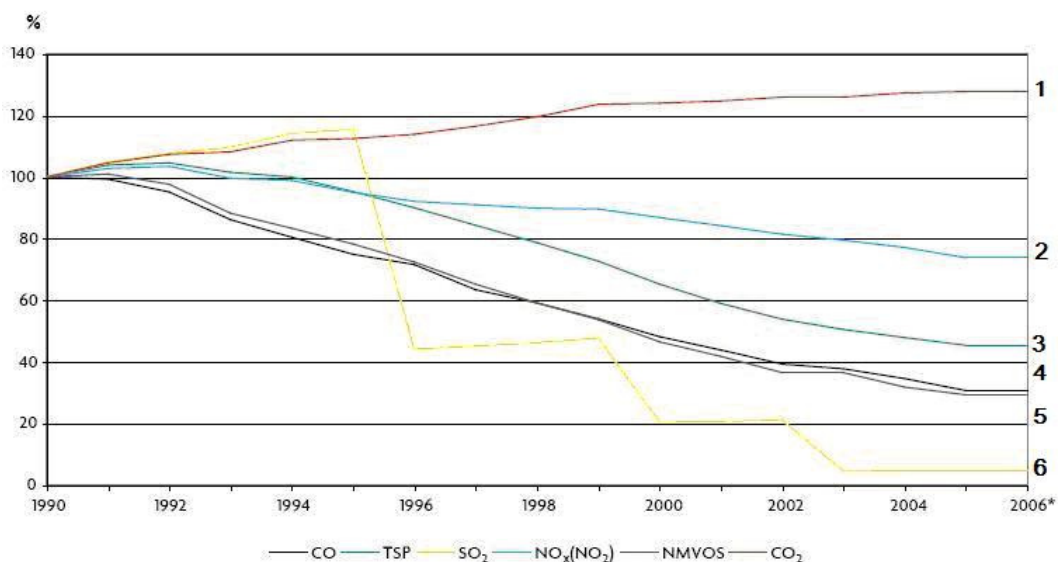
Specifieke stoffen

Hiermee bedoelen we kleine vaste of vloeibare partikels die gevonden kunnen worden in de lucht of in emissies zoals stof, rook en smog. De bronnen voor deze stoffen zijn legio. Zo kunnen kleine asbest

en andere deeltjes vrijkomen bij het gebruik en slijtage van banden en remmen. Dieselmotoren zullen op dit vlak relatief vervuילend zijn, ze stoten namelijk veel meer PM10 uit dan een gelijkaardige benzinemotor (Nicolopoulou et al., 2005, p.86). PM10 zijn deeltjes met een diameter kleiner dan 10 µm, en worden vaak benoemd als fijn stof. Volgens Button (1993) is het transport de belangrijkste bron van kleine partikel emissies in de geïndustrialiseerde landen. Deze stoffen kunnen giftig zijn of toxische elementen bevatten. Deze stoffen zijn niet enkel een gevaar voor het ecosysteem en de gezondheid van de mens, het veroorzaakt ook kosten aan fysieke structuren in termen van schoonmaken en herverven.

jaar	CO		TSP		SO ₂		NO _x (NO ₂)		NH ₃		NMVOS		CO ₂		CH ₄		N ₂ O	
	ton	%	ton	%	ton	%	ton	%	ton	%	ton	%	kton	%	ton	%	ton	%
1990	403402	100	7030	100	9012	100	105038	100	91	100	55986	100	11482	100	3377	100	677	100
1991	400534	99	7306	104	9457	105	107960	103	118	130	56583	101	12007	105	3563	106	717	106
1992	383780	95	7352	105	9706	108	108779	104	194	214	54691	98	12323	107	3551	105	759	112
1993	347480	86	7142	102	9896	110	104617	100	376	413	49382	88	12429	108	3381	100	846	125
1994	324584	80	7034	100	10293	114	103934	99	534	587	46675	83	12849	112	3266	97	940	139
1995	302099	75	6702	95	10417	116	99789	95	666	732	43811	78	12924	113	3150	93	1013	150
1996	289014	72	6330	90	3982	44	96749	92	804	883	40531	72	13077	114	3122	92	1088	161
1997	255752	63	5934	84	4065	45	95543	91	910	1000	36515	65	13384	117	2819	83	1168	172
1998	238688	59	5532	79	4166	46	94448	90	1010	1110	33130	59	13730	120	2642	78	1254	185
1999	217771	54	5110	73	4301	48	94149	90	1115	1225	30026	54	14196	124	2398	71	1347	199
2000	194429	48	4582	65	1841	20	91192	87	1161	1276	25997	46	14248	124	2102	62	1389	205
2001	176892	44	4148	59	1858	21	88413	84	1177	1293	23414	42	14318	125	1877	56	1422	210
2002	158324	39	3786	54	1899	21	85622	82	1187	1305	20417	36	14462	126	1661	49	1457	215
2003	152269	38	3547	50	403	4	83582	80	1166	1281	20433	36	14461	126	1561	46	1456	215
2004	139360	35	3366	48	408	5	80980	77	1162	1277	17786	32	14619	127	1414	42	1486	219
2005	123482	31	3189	45	410	5	77522	74	1129	1241	16380	29	14672	128	1258	37	1500	221
2006*	123482	31	3189	45	410	5	77522	74	1129	1241	16380	29	14672	128	1258	37	1500	221

Tabel 3.1 : Evolutie van voornaamste emissies in de periode 1990-2006 in Vlaanderen, VMM (2007)



Figuur 3.4 : Evolutie van CO (4) , TSP (2), SO₂ (6), NO_x (2), NMVOS (5) en CO₂ (1) in de periode 1990-2006 in Vlaanderen, VMM (2007)

Ongevallen

Het transporteren van goederen en diensten is niet risicoloos. Dagelijks horen we nieuwsberichten over ongevallen waarbij vrachtwagens betrokken zijn. Ook andere transportmodi lopen een gevaar, hoewel het risico bij deze meestal aanzienlijk lager ligt (Button 1993). Als men de ongevalrisicograden van de verschillende modi onder de loep neemt, merkt men namelijk op dat het transport over de weg de ongelukstatistieken domineren. De ongevallen die zich voordoen bij het transport zullen niet enkel invloed hebben op de transporterende partijen, maar ook op derden. Daarenboven zal het gevaar van een ernstig ongeluk aanzienlijk verhoogd worden bij het transport van gevaarlijke en toxische substanties.

Uiteraard is het van primordiaal belang dat de externe ongevalkosten zo goed mogelijk gewaardeerd worden. Men dient zowel de directe als indirecte externe ongevalkosten te schatten inclusief het menselijk leed dat niet opgenomen is in de interne kosten. Het probleem hierbij is echter dat ongevalrisico's al reeds gedeeltelijk geïnternaliseerd zijn in het transport aangezien dat de transportgebruiker en/of de transportonderneming zich kan verzekeren voor dit risico. Uiteraard zal het hoogst onwaarschijnlijk zijn dat het verzekerde risico perfect overeenstemt met het werkelijke risico. Daarenboven zijn er ook nog derde persoon risico's aanwezig tijdens het transport van gevaarlijk en toxische substanties. Het uiteindelijke doel is om alle directe en indirecte externe ongevalkosten, inclusief het menselijk leed, om te vormen in directe interne kosten.

De laatste decennia zijn er verscheidene methodes ontwikkeld om de ongevalrisico's te waarderen. De waarderingsmethoden die vandaag de dag gebruikt worden, variëren sterk van land tot land. De meest gebruikte technieken zijn gebaseerd op de 'averting behaviour' methode, de verloren productie/consumptie calculatie en de 'revealed preference' methode. We bespreken hieronder enkel de verloren productie/consumptie methode. Voor meer informatie omtrent de andere waarderingsmethode verwijzen we de lezer naar het onderdeel 3.3.3 van dit hoofdstuk. De verloren productie methode gaat na welke productie er verloren gaat indien een persoon overlijdt in een transportongeluk. Hierbij wordt nagegaan wat deze persoon mogelijk zou kunnen geproduceerd hebben indien hij niet vroegtijdig omgekomen was. Dit verlies is dan de externe kost van het verlies van een mensenleven in het transport. Het probleem bij deze methode is echter dat pensioengerechtigde niet meer gewaardeerd worden, aangezien ze niets meer produceren. Vandaar dat men vaak gebruikt maakt van de verloren consumptie methode. Deze veronderstelt dat het individu en de samenleving in zijn geheel voordeel zou hebben indien de persoon niet vroegtijdig was omgekomen. Dit verloren voordeel wordt berekend door na te gaan wat de persoon mogelijk nog geconsumeerd zou hebben. De waarde van deze verloren consumptie dient dan als indicatie van de externe kost van het verlies van een mensenleven. Uiteraard dient men ook de kost van verwondingen te gaan waarderen. Gezien de grote variëteit van de verwondingen en de gevolgen hiervan, is het geen eenvoudige opdracht om de kost hiervan te berekenen. De verschillende methoden die men hiervoor gebruikt vallen buiten het bestek van deze eindverhandeling.

De Brabander heeft in 2007 een rapport geschreven waarin hij poogt de dodelijke slachtoffers in Vlaanderen te waarderen. Om tot deze waardering te komen heeft hij gebruik gemaakt van de 'revealed preference' methode. Deze methode wordt later in dit hoofdstuk toegelicht. Hij concludeert dat de eenheidswaarde per dodelijk slachtoffer ongeveer 6 miljoen euro bedraagt in Vlaanderen. Voor de exacte waarde en zijn samenstellende elementen verwijzen we naar bijlage 2.

Elk jaar vallen er ongeveer 900 doden, 7000 ernstig gewonden en 39 000 licht gewonden op de Vlaamse wegen. Tabel 3.3 geeft de evolutie weer van het aantal verkeersslachtoffers op de Belgische wegen. Hoewel het aantal dodelijke slachtoffers blijft verminderen, is de daling de laatste jaren minder uitgesproken. In 2006 bedroeg het gemiddeld aantal verkeersdoden per 100 000 inwoners in België 10,2 wat lager is dan het Europees gemiddelde van 11.(IRTAD, 2007). Indien we op basis van de onderzoeksresultaten van De Brabander de jaarlijkse totale kost berekenen van het aantal dodelijke slachtoffers in België, bekomen we een bedrag van 6 GEUR, wat meer dan 2 procent bedraagt van het bruto binnenlands product.

	2003	2004	2005	2006
Accidents	50.675	48.790	49.307	49.171
Fatalities	1.216	1.163	1.089	1.069
Injured	66.256	63.632	65.342	65.297
Population	10.355.844	10.396.421	10.445.852	10.511.382
Fatalities/100.000 inhabitants	11,7	11,2	10,4	10,2

Tabel 3.2 : Evolutie van het aantal verkeersslachtoffers in België in periode 2003-2006, IRTAD (2007)

Visuele hinder

De transportinfrastructuur en het transport zelf worden vaak gepercipieerd als visueel hinderend en verre van esthetisch. Het probleem hier is echter hoe deze soort van overlast gemeten dient te worden. Het is belangrijk dat bij deze metingen de transportinfrastructuur in zijn omgevingscontext beoordeeld wordt. Zo zal een nieuwe autosnelweg doorheen een natuurreservaat grotere overlast met zich meebrengen dan een bijkomende autosnelweg in een industriegebied. Daarenboven zal design ook een belangrijke invloed hebben op de mate van visuele hinder.

Vibraties

Laag overvliegende vrachttoestellen, zwaar geladen vrachtvoertuigen en treinwagens creëren grote vibraties die zowel invloed hebben op de gezondheid van omliggende bewoners als de structurele integriteit van bouwwerken. Ook hier doet zich de moeilijkheid voor om de werkelijke externe kosten te berekenen. Hoewel er een verband is tussen de intensiteit van de vibraties en de belasting van de

assen, is het gebleken dat het onmogelijk is om dit te relateren met een meting van structurele schade.(Button, 1993) Naarmate bouwtechnieken verbeteren, zal de structurele schade ten gevolge van deze vibraties afnemen. De invloed van vibraties op de gezondheid van mensen kan gerelateerd worden met geluidsoverlast.

Gemeenschapscheiding

Wegen, kanalen, spoorwegen en andere transportinfrastructuur kunnen zich manifesteren als belangrijke fysieke barrières voor menselijk contact. Zo kan een nieuwe autosnelweg een bestaande gemeenschap in twee delen splitsen waarbij het fysiek contact tussen beide delen erg moeilijk wordt. Verder verstaan we onder gemeenschapscheiding ook nog het verdwijnen van de ontmoetingsfunctie van wegen voor kinderen en volwassenen en de 'rebound' effecten van het wegvervoer. Een voorbeeld van deze laatste is de schijnbare tijdswinst die gemaakt wordt met het wegtransport, die soms meer dan verloren gaat door neveneffecten, zoals bijvoorbeeld kinderen die omwille van het verhoogd risico zich niet meer met de fiets kunnen verplaatsen. Het is echter zeer moeilijk om deze externe effecten monetair te waarderen.

3.3.3 : Waarderingsmethoden voor externaliteiten

In deze paragraaf gaan we op systematische wijze de belangrijkste waarderingsmethodes toelichten. Deze methoden laten ons toe om externe effecten monetair te waarderen. Het doel van deze methode is niet om de werkelijke waarde exact te bepalen maar om een betrouwbare schatting te geven van de kosten of voordelen. Deze monetaire waardering van de externe factoren is noodzakelijk om de marginale kosten en opbrengsten te berekenen van de pure vervuiling. Op basis van deze laatste twee kan men het optimale pure vervuilingpunt bepalen. Achtereenvolgens bespreken we de volgende methoden: precedenten, 'averting behaviour', 'revealed preference', 'travel-cost' en de 'stated preference' methode.

Precedenten methode

Men kan historische precedenten gebruiken om bepaalde aspecten of effecten te waarderen. Men gaat er dan wel vanuit dat deze aspecten of effecten consistent zijn in de tijd. Deze techniek wordt voornamelijk gebruikt voor het waarderen van verwondingen en dodelijke slachtoffers veroorzaakt door transportongelukken. Hoewel deze waarderingmethode zeer aantrekkelijk kan ogen, heeft het belangrijke praktische beperkingen (Button, 1993).

'Averting behaviour' methode

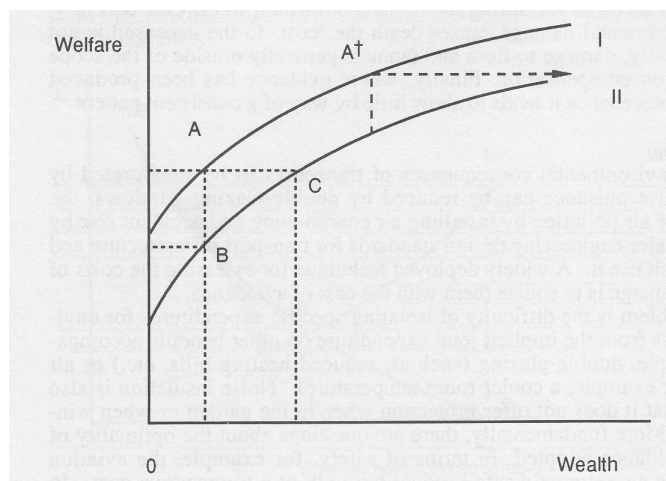
Deze methode zal de externe factoren gaan waarderen op basis van de maatregelen die men kan nemen om personen of dingen te isoleren van deze factoren. De waarde van een negatieve factor komt overeen met de kosten van de maatregelen die dienen genomen te worden indien men personen of dingen wil isoleren van dit effect. Bijvoorbeeld: een huishouden kan geconfronteerd worden met geluidsoverlast. De waarde van deze overlast is volgens deze methode gelijk aan de kost om het huis te voorzien van goed isolerende dubbele beglazing.

Het grootste probleem dat men ondervindt bij het gebruik van deze methode is dat de maatregelen, waarop de waarderingen zijn gebaseerd, mogelijk verschillende negatieve effecten zal isoleren. Zo zal een goede dubbele beglazing niet enkel de geluidsoverlast doen dalen, maar tegelijk zorgen voor een betere isolatie en bescherming tegen vibraties. Daarenboven houdt men geen rekening met de vraag of dat het niveau van het externe effect na het toepassen van de maatregelen wel optimaal is. Indien dit laatste niet het geval is, zullen de beslissingen gebaseerd op de informatie van de 'averting behaviour' methode niet leiden tot een optimale situatie (Button 1993).

'Revealed preference' methode

Deze techniek veronderstelt dat mensen gebruikers zijn van omgevingsresources. In sommige gevallen zullen ze door hun acties impliciet de waarde weergeven van deze resources. De gebruikers zullen afwegingen maken tussen het opofferen van monetaire voordelen en het beperken van het gebruik van een bepaalde resource of het verkrijgen van een omgevingsvoordeel. Een klassiek voorbeeld hiervan is de bereidheid van gezinnen om extra te betalen om te wonen in een gebied ver verwijderd van luchthavens en spoorwegen of om een hotelkamer te krijgen welke niet aan de straatkant ligt.

De onderliggende theorie kunnen we uitleggen aan de hand van onderstaande figuur 3.5. Deze figuur geeft de relatie tussen de welvaart en de rijkdom van een individu weer. Omwille van het dalende marginale nut van geld, zal het individu een afwegingscurve hebben. Stellen we nu dat het individu woont in een rustige omgeving en dat de overeenstemmende afweging gelijk is aan curve I in figuur 3.5. Indien er een luchthaven in de nabijheid van de woonplaats van het individu zou komen, dan zullen de kosten van de geluidsoverlast het welzijn van het individu voor elk niveau van rijkdom doen dalen. De afwegingscurve daalt naar curve II in figuur 3.5. Indien het individu oorspronkelijk een welzijn had van A, zal deze na de constructie van de luchthaven dalen tot B. Indien het individu terug van een welzijn van A wil genieten, dan dient hij zijn rijkdom te verhogen tot het punt C. De hoogte van de externe kost veroorzaakt door de geluidsoverlast bedraagt BC. Dit betekent dat een compensatie van BC er voor zorgt dat het individu terug op zijn oorspronkelijk welzijn niveau komt.



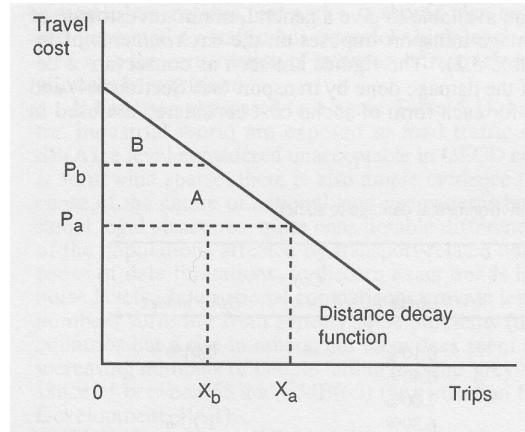
Figuur 3.5 : Weergave van de relatie welzijn en rijkdom van een individu, Button (1993) p. 98

Deze methode veronderstelt wel dat er een eindig niveau van compensatie bestaat welke satisfactie biedt aan het individu. Deze situatie is niet altijd aanwezig. Stel bijvoorbeeld dat het individu een oorspronkelijk welzijn heeft van A^* : het is dan niet duidelijk welke compensatie nodig is om het individu terug op hetzelfde welzijnpunt te brengen. Uiteraard zal men bij de praktische implementatie van deze methode nood hebben aan gesofistikeerde econometrische analyses.

'Travel-cost' methode

Een nieuwe verkeersinfrastructuur kan recreatiedomeinen, zoals parken en visfaciliteiten, doen verdwijnen. Meestal worden deze domeinen gratis aangeboden. Dit betekent echter niet dat het verdwijnen van deze faciliteiten geen externe kost met zich meebrengt. Mensen waren namelijk bereid om tijd en geld te investeren om te kunnen genieten van deze domeinen. De factor tijd en geld die mensen hierin investeerden komt tot uitdrukking in de verplaatsingskosten. Deze kosten geven een idee omtrent de gepercipieerde waarde van deze domeinen.

We maken gebruik van onderstaande figuur 3.6 om deze methodiek verder toe te lichten. Op de x-as staan het aantal bezoekers dat een domein krijgt per tijdseenheid. Op de y-as staan de geassocieerde transportkosten. Op basis van enquêteringen zou men kunnen bepalen dat het aantal bezoekers van een recreatiedomein welke gelegen is in gebied A gelijk is aan X_a , en voor een recreatiedomein in gebied B gelijk is aan X_b . Indien we dit herhalen voor verschillende gebieden dan bekomen we uiteindelijk de 'distance decay' functie welke weergegeven wordt in figuur 3.6. Op basis van deze functie kan men het consumentensurplus berekenen van een individu. Bijvoorbeeld: een individu dat zich in het gebied A bevindt, zal een consumentensurplus hebben van $A+B$. Het totale surplus voor alle individuen die zich in het gebied A bevinden bedraagt $(A+B)$ vermenigvuldigd met het aantal bezoekers, in dit geval X_a . Gelijkaardige berekeningen laten ons toe om het totale consumentensurplus te berekenen voor bezoekers afkomstig van andere gebieden.



Figuur 3.6 : Weergave van de 'travel cost' methode, Button (1993) p.99

Het grootste probleem waarmee men geconfronteerd wordt bij het gebruik van deze methode is het specificeren van de gegeneraliseerde kostenfunctie. Hierbij heeft men nood aan een monetaire waardering van de reistijd. Deze laatste is alles behalve eenvoudig.

'Stated preference' methode

Deze methode beoogt niet externe effecten te waarderen op basis van het observeren van afwegingen. Hierbij gaat men daarentegen pogen om informatie te verkrijgen over de afwegingen die individuen kunnen maken indien ze geconfronteerd zouden worden met bepaalde situaties. De meest gebruikte techniek in deze context is het hanteren van enquêtes en interviews. Hierbij wordt aan een groep of individu gevraagd welke compensatie nodig is om hun huidig niveau van welzijn te kunnen bewaren indien er zich een specifieke externe transportkost zou voordoen.

Uiteraard dient de vraag gesteld te worden of deze geprefereerde afweging zich in de werkelijkheid zouden voordoen indien individuen daadwerkelijk met dergelijke externe effecten geconfronteerd zouden worden.

Een van de grootste problemen bij het toepassen van de hierboven vermelde waarderingmethoden is dat ze niet allemaal dezelfde theoretische basis delen. Het gevolg hiervan is dan ook dat het moeilijk is de resultaten van de verschillende methodes te vergelijken met elkaar.

3.4 : Verkeer congestie : pure congestie

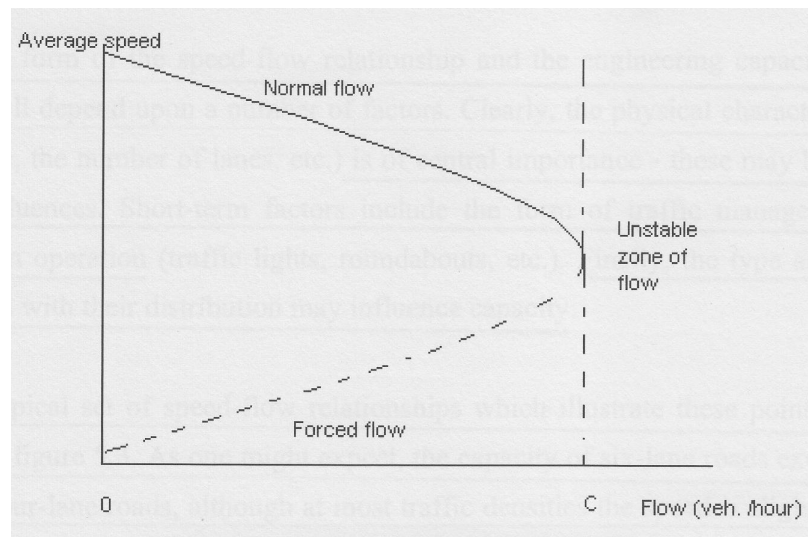
3.4.1 : Algemeen

De vraag naar het transport van goederen en diensten is niet constant in de tijd. Daarenboven heeft de transportinfrastructuur op korte termijn een vaste eindige capaciteit. Wanneer gebruikers van een bepaalde faciliteit beginnen te interfereren met andere gebruikers omwille van een beperking van de infrastructuur, dan zullen er congestie externaliteiten aanwezig zijn. Uiteraard zal een minimum hoeveelheid van congestie onvermijdbaar zijn gezien de faciliteiten anders grotendeels ongebruikt zouden blijven. De vraag is dus niet of congestie zich zal voordoen maar wat het optimale niveau is.

Button (1993) merkt op dat congestie niet enkel kosten veroorzaakt voor de transportinfrastructuur gebruiker in termen van verloren tijd (welzijnverlies) en brandstof, maar het starten en stoppen zal ook bijdragen tot de verloedering van de atmosfeer en andere vormen van vervuiling. Hoewel elke modus wel eens geconfronteerd wordt met congestie, is het probleem het grootste bij het wegtransport. Vandaar dat we in dit onderdeel de congestie-effecten en hun waarderingen gaan bespreken vanuit de invalshoek van het wegtransport. Dit concept kan ook toegepast worden op andere modi.

De economische congestiekosten kunnen berekend worden door gebruik te maken van het concept van de 'speed-flow' relatie. Deze geeft de relatie weer tussen de gemiddelde snelheid van de voertuigen en het volume van het verkeer per uur (flow) dat gebruik maakt van de infrastructuur. We verkrijgen aldus een figuur zoals 3.7. Uit deze figuur kunnen we afleiden dat de 'flow' per uur afhankelijk is van het aantal voertuigen die op de weg komen en de gemiddelde snelheid van deze gebruikers. Het gevolg is dat bij lage volumes van verkeer de interferentie tussen de voertuigen nihil is, waardoor hoge gemiddelde snelheden mogelijk zijn. Uiteraard zijn deze snelheden beperkt door enerzijds de capaciteit van de voertuigen en anderzijds de officiële snelheidsbeperkingen. Naarmate er meer voertuigen toegang proberen te krijgen tot de weg, zullen de nieuwe gebruikers interageren met de bestaande. Het gevolg is dat de snelheid van zowel de nieuwe als bestaande gebruikers zal dalen. Hoewel de gemiddelde snelheid daalt, zal het totale volume van verkeer per uur stijgen aangezien het additionele effect van één extra voertuig groter is dan de reductie in de gemiddelde snelheid van alle andere gebruikers. Deze situatie noemt Button (1993) de normale 'flow'. Er zal echter steeds een punt zijn waarop de toename in het volume van het verkeer net gelijk is aan de daling van de gemiddelde snelheid. Dit punt geeft het maximale volume weer van het verkeer over de weg. Deze fysieke maximum capaciteit moet onderscheiden worden van de economische capaciteit. Deze laatste wordt gedefinieerd als het volume van het verkeer waarbij de kost van één bijkomend voertuig gelijk is aan het voordeel dat dit bijkomend voertuig genereert. Indien men voorbij het punt van de maximale fysieke capaciteit gaat, dan zal het volume van het verkeer per uur en de gemiddelde snelheid dalen. Deze situatie noemt Button (1993) de 'forced flow'. Naarmate de gebruikers meer ervaring krijgen met het concept van congestie, zal de kwaliteit van hun besluitvorming in verband met het verkeer

aanzienlijk verbeteren. Het gevolg is dat tijdens piekuren het volume van het verkeer zich in de zone van 'onstabiel volume' zal bevinden.

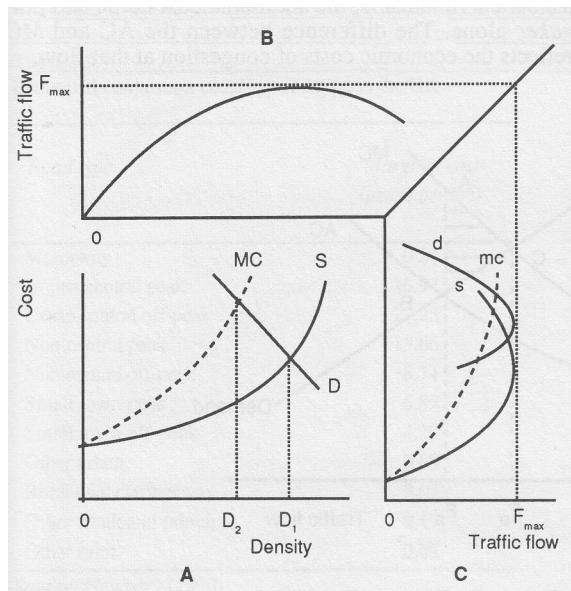


Figuur 3.7 : Weergave van de 'speed-flow' relatie, Button (1993) p.111

De werkelijke vorm van de 'speed-flow' relatie en de maximale fysieke capaciteit van een specifieke weg, zal afhankelijk zijn van verschillende factoren. De fysieke eigenschappen, ook wel langetermijnfactoren genoemd, van de weg, zoals ondermeer de breedte en het aantal rijvakken, zijn een belangrijke factor. De kortetermijnfactoren zijn onder andere de vorm van het verkeermanagement en de stuurschema's in de operaties (verkeerslichten, rotondes, etc). Uiteraard zal het type en de leeftijd van de voertuigen gecombineerd met hun distributie, de capaciteit beïnvloeden.

De zojuist besproken 'speed-flow' relatie geeft ons inzicht in de aanbodzijde van de verkeersinfrastructuur. Als we naar de vraagzijde kijken dan merken we op dat de gebruikers van een verkeersinfrastructuur zich bekommeren om ruimte op de weg. Evans (1992) biedt een theoretisch kader dat zowel de vraagzijde als de aanbodzijde met elkaar verbindt. Hierbij zal de dichtheidsfunctie, welke de hoeveelheid voertuigen weergeeft op de weg op een bepaald tijdstip, een belangrijke rol spelen.

Onderdeel B van de figuur 3.8, geeft de 'speed-flow' relatie weer maar op een andere wijze dan hierboven besproken. De maximale fysieke capaciteit wordt weergegeven door F_{max} . Onderdeel C is het 'travel cost-flow' diagram en A is het 'travel cost-density' diagram. Zoals we in figuur 3.6 kunnen zien, zijn alle drie onderdelen met elkaar verbonden. We bespreken eerst het 'travel cost-density' diagram.



Figuur 3.8 : Weergave van de 'speed-flow' relatie en de vraag naar ruimte op de weg. Deze figuur verklaart het bestaan van de relatie tussen de dichtheid, verplaatsingskosten, 'flow' en de snelheid. A geeft de relatie weer tussen de verplaatsingskost en de dichtheid van de weginfrastructuur. B geeft de relatie weer van de 'verkeersflow' en de dichtheid. C geeft de 'speed-flow' relatie weer. Button (1993) p.113

Het 'travel cost-density' diagram geeft de relatie weer tussen de verplaatsingskosten en de dichtheid van de weg. In onderdeel A vinden we ondermeer de D curve. Deze geeft de vraag weer van potentiële gebruikers om toegang te verkrijgen tot een bepaalde weg. De MC curve geeft de marginale kost van congestie weer die één extra gebruiker teweegbrengt bij de bestaande gebruikers van de weginfrastructuur. Deze laatste curve kent een stijgend verloop in functie van de dichtheid van de weg. De S curve representeert de kost van het gebruiken van een weginfrastructuur doorheen de ogen van de bijkomende gebruiker. Deze gebruiker zal enkel rekening houden met zijn eigen verplaatsingskosten. De gebruiker zal met andere woorden de gevolgen van zijn of haar acties niet in rekenschap brengen.

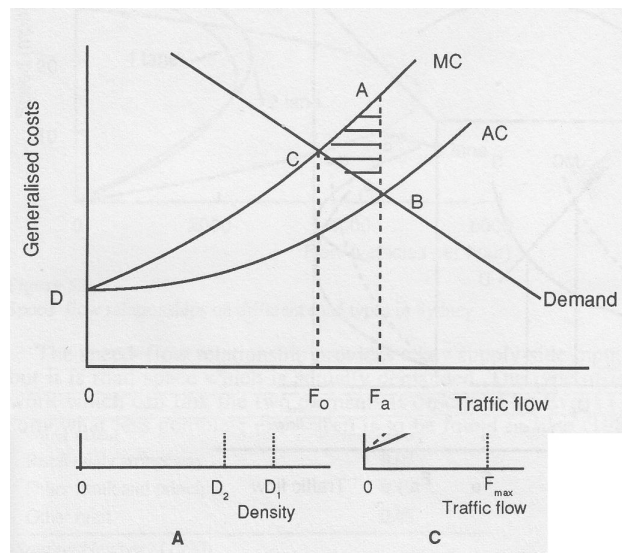
Het 'travel cost-flow' diagram, onderdeel C van figuur 3.8, verbindt onderdeel A en B met elkaar. De s curve geeft de gemiddelde gegeneraliseerde kost weer van de verplaatsing voor verschillende niveaus van volume van verkeer. De gegeneraliseerde kost houdt zowel rekening met de directe- en tijdskosten, als kwalitatieve elementen zoals schaderisico's en betrouwbaarheid. De mc is de marginale kosten curve welke de totale additionele congestie kost weergeeft die een bijkomend gebruiker teweeg brengt op het bestaande volume van verkeer. De d curve drukt de afgeleide vraag uit, welke het gewenste volume van het verkeer weergeeft in functie van de verplaatsingskosten (Button, 1993, p.113).

De werkelijke verkeersdichtheid kan grafisch achterhaald worden door het snijpunt te zoeken van de vraag naar ruimte op de weg met de gemiddelde kost van het gebruiken van een weginfrastructuur doorheen de ogen van de bijkomende gebruiker. In figuur 3.8 komt dit overeen met het punt D_1 . Deze dichtheid zal echter boven het optimale niveau liggen. De optimale dichtheid komt overeen met

het snijpunt van de marginale kostencurve met de vraagcurve. Dit houdt in dat het optimale niveau enkel bereikt zal worden indien de weggebruikers rekening houden met hun onderlinge afhankelijkheid. Het optimale volume verkeer kan achterhaald worden door in onderdeel C van figuur 3.8 het snijpunt te bepalen van de afgeleide vraagcurve d met de marginale congestiekost curve, mc .

3.4.2 : Economische kost van congestie

Volgens Button (1993) zullen de meeste congestie analyses zich focussen op segment C van figuur 3.8. Deze wordt meestal voorgesteld in de vorm weergegeven in onderstaande figuur 3.9. Hierbij geeft de AC curve de gemiddelde kost van congestie weer voor elk niveau van het volume verkeer. De MC curve representeert de kost van additioneel verkeer bovenop het bestaande volume. Het optimale volume komt, zoals reeds hierboven uitgelegd, overeen met het snijpunt van de MC curve met de vraag curve. In figuur 3.9 komt dit overeen met het punt C met een overeenkomstige verkeer volume van F_0 . Aangezien de meeste weggebruikers geen rekening houden met de congestiekosten die ze opleggen aan anderen, zal het werkelijke volumeverkeer gelijk zijn aan F_a .



Figuur 3.9 : Weergave van het maatschappelijk verlies (deadweight loss) veroorzaakt door een te hoog niveau van congestie. Indien er een 'traffic flow' aanwezig is van F_a , dan zal het maatschappelijk verlies gelijk zijn aan ABC. Button (1993) p.114

De AC en MC curve geven de gemiddelde en marginale geeneraliseerde kosten weer geassocieerd met verschillende verkeer volumes. Ze geven zowel de tijd- als geldkosten weer. Deze curven kunnen daarom geïnterpreteerd worden als 'sociale kosten' in de samenleving van weggebruikers (Button, 1993, p 114). Een individuele gebruiker welke toegang zoekt tot de weginfrastructuur, zal enkel rekening houden met zijn persoonlijke kosten. Hij zal dus enkel de gemiddelde kost considereren en geen rekening houden met de congestie impact van zijn verplaatsing op andere gebruikers. Vandaar dat vaak gearchumenteed wordt dat de MC curve de marginale sociale kost weergeeft voor elke nieuwe en bestaande gebruiker bij een toename in het verkeervolume. De AC curve kan geïnterpreteerd worden als de marginale private kosten curve, welke de additionele kost weergeeft die

enkel de nieuwe gebruiker draagt en percipieert. Volgens Button (1993) zal het verschil tussen de AC en MC curve bij elk niveau van het verkeersvolume de gerelateerde economische kost weergeven van de congestie.

Het is vaak belangrijk om zich een idee te vormen over de werkelijke kosten die geassocieerd zijn met een te hoog niveau van congestie. Vanuit een sociaal oogpunt zal het werkelijke verkeersvolume, F_a , te hoog zijn aangezien de laatste bijkomende gebruiker enkel van een voordeel geniet ter grootte van $F_a B$ maar een kost veroorzaakt van $F_a A$. Het bijkomende verkeer voorbij het optimale punt F_0 genereert een kost van $F_0 C A F_a$, maar geniet enkel maar van een voordeel van $F_0 C B F_a$. Het gevolg is dat er een 'deadweight loss' bestaat ter grote van ABC . Een verkeersvolume lager dan het punt F_0 is ook niet optimaal, aangezien het voordeel van een bijkomende gebruiker groter is dan de sociale marginale kost. Uiteraard dienen we op te merken dat er bij het optimale verkeersvolume ook congestiekosten aanwezig zijn. Deze kosten, die weergegeven worden door de AC en MC curven, worden meer dan vergoed (off-set) door de voordelen die de gebruikers van de weg ervaren.

De hierboven weergegeven analyse van het congestie probleem is gebaseerd op een eenvoudig modelleringsraamwerk: een lineaire weg, geen kruispunten, homogeen verkeer en even ervaren bestuurders. In de praktijk zullen deze veronderstellingen niet altijd gelden. De totale kostfunctie zal variëren naargelang de details van de transportinfrastructuur onder consideratie. Er kan een onderscheid gemaakt worden tussen vijf algemene types van congestie. Hoewel we deze toelichten in termen van het wegtransport, kunnen ze ook toegepast worden voor andere modi. De vijf types van congestie zijn:

1. **Eenvoudige interactie**

Dit doet zich voor bij lage niveaus van verkeersvolume waarbij de hoeveelheid mobiele eenheden klein zijn. Vertragingen in dit geval zijn minimaal en worden voornamelijk veroorzaakt door trage en voorzichtige gebruikers van de infrastructuur. Volgens Button (1993) varieert de totale vertraging als het kwadraat van het verkeersvolume.

2. **Meerdere interacties**

Dit type van congestie doet zich voor bij hogere niveaus van verkeersvolume. Hoewel de fysieke maximum capaciteit nog niet bereikt is, zal een bijkomende gebruiker een grotere vertraging veroorzaken voor de reeds bestaande gebruikers dan in de eenvoudige interactie het geval is.

3. **'Bottleneck' situatie**

Deze situatie doet zich voor wanneer een specifiek onderdeel van de weginfrastructuur een lagere fysieke maximum capaciteit heeft. Indien het verkeersvolume onder deze capaciteit ligt, dan zal het type van congestie dat zich voordoet overeenstemmen met dat van de eenvoudige of

meerdere interacties. Indien echter het volumeverkeer het niveau van de 'bottleneck' capaciteit bereikt, dan zullen er wachtrijen ontstaan.

4. **'Triggerneck' situatie**

Dit type van congestie doet zich voor wanneer een 'bottleneck' situatie resulteert in wachtrijen die zo lang zijn dat niet enkel de stroom van de gebruikers van de 'bottleneck' beïnvloed wordt maar ook de stroom van het verkeer dat geen gebruik wil maken van deze 'bottleneck'. In extreme situaties kan de congestie zo ernstig worden dat het verkeer volledig tot stilstand komt en enkel terug op gang kan komen indien sommige voertuigen rechtsomkeer maken.

5. **Netwerk en controle congestie**

De inspanningen van verkeerskundigen en managers kunnen de congestiekosten op bepaalde tijdstippen reduceren maar tegelijk op andere tijdstippen doen toenemen. Dit resultaat wordt veroorzaakt door het gebruiken van bepaalde verkeer controletechnieken. Hoewel deze technieken belangrijke problemen oplossen, kunnen ze de aanleiding geven tot het ontstaan van andere problemen.

3.5 : Analyse voor het haalbaarheidsmodel van het multimodaal vervoer

3.5.1 : Inleiding

In deze paragraaf analyseren we de ecologische, energetische en externe kosten van zowel het unimodaal als het multimodaal vervoer. We zullen ons hierbij baseren op de vorige paragrafen. Het doel is om het ecologisch, het energetisch en het sociaal-economisch vergelijkingscriterium te ontwikkelen. Deze zullen gebruikt worden bij de afleiding en constructie van de haalbaarheidsmodellen van het multimodaal vervoer, die worden afgeleid en besproken in hoofdstukken vier, vijf en zes. Deze modellen zullen op een grafische manier de gebieden weergeven waarbinnen bepaalde multimodale trajecten voordeliger zijn dan de unimodale en/of andere multimodale trajecten.

Vooraleer we starten met de afleiding van de kostenmodellen, dienen we eerst nog een paar zaken duidelijk te maken. Aangezien we deze vergelijkingscriteria willen gebruiken bij de afleiding van de haalbaarheidsmodellen, zullen we de kosten moeten definiëren in termen van deze laatste. Zo zullen we alle kostenelementen moeten onderverdelen in kilometerafhankelijke kosten en constante kosten. De kilometerafhankelijke kosten dienen uitgedrukt te worden in EUR/tonkm en de constante kosten in EUR/ton. Net zoals in het vorige hoofdstuk veronderstellen we dat deze marginale kilometerafhankelijke kosten en de marginale constante kosten voor elke modus constant zijn in functie van de tijd en afstand.

In deze analyse maken we een onderscheid tussen de gemiddelde en de marginale externe kosten.

- De **gemiddelde externe kosten** zijn de totale kosten die alle gebruikers te samen te weeg brengen in een bepaalde periode. Deze kosten worden berekend per voertuigkilometer. Deze gemiddelde externe kosten zijn een goede maatstaf voor de milieuschade die het verkeer over de weg met zich meebrengt.
- De **marginale externe kosten** zijn de additionele kosten die één extra voertuigkilometer met zich mee brengt. Volgens De Ceuster (2004) kunnen we ervan uitgaan dat in het algemeen de marginale kosten veel hoger liggen dan de gemiddelde kosten. We kunnen het sociaal-economisch optimum bereiken wanneer men de externe marginale kosten zouden verrekenen aan de respectievelijke veroorzakers.

In de komende analyse zullen we gebruik maken van de marginale externe kosten. We beginnen bij het modeleren van de ecologische kosten van zowel het unimodaal als multimodaal transport.

3.5.2 : Ecologische vergelijkingscriterium

In dit model pogen we de ecologische kostenstructuur weer te geven van het uni- en multimodaal transport. Onder ecologische kosten verstaan wij de monetaire waardering van alle negatieve effecten

die veroorzaakt worden door de emissies van transportgerelateerde gassen. Deze emissies bestaan uit brandstofadditieven, CO₂, NO_x, CO, SO₂ en vluchtige organische stoffen.

Unimodaal transport

Goederen zullen van het vertrekpunt A getransporteerd worden naar hun eindbestemming B. Hierbij wordt enkel gebruik gemaakt van één specifieke modus. De ecologische kosten worden veroorzaakt door deze modus en het in- en uitladen van de goederen. We kunnen de ecologische kostenstructuur als volgt weergeven:

$$TEK = (additieven + CO_2 + NO_x + CO + SO_2 + (NM)VOS) \times \text{aantal km} + \text{laden}$$

Met TEK : Totale ecologische kosten

Additieven : de kost van de uitstoot van additieven per tonkm

CO₂ : de kost van de uitstoot van koolstofdioxide per tonkm

NO_x : de kost van de uitstoot van stikstofoxide per tonkm

CO : de kost van de uitstoot van koolstofoxide per tonkm

SO₂ : de kost van de uitstoot van zwaveldioxide per tonkm

(NM)VOS : de kost van de uitstoot van vluchtige organische stoffen per tonkm

Aantal km : de totale afstand tussen A en B.

Laden : de kost van de uitstoot tijdens het in- en uitladen van goederen per ton

Multimodaal transport

Hierbij zal men gebruik maken van een specifieke combinatie van modi om de goederen te transporteren van A naar B. De ecologische kosten worden veroorzaakt door zowel de combinatie van modi, als het in- en uitladen en overslag van de goederen. De kostenstructuur kan als volgt weergegeven worden:

$$TEK = \text{emissies}_V \times \text{aantal km voorttransport} + \text{emissies}_H \times \text{aantal km hoofdtransport} \\ + \text{emissies}_N \times \text{aantal km natransport} + \text{emissies laden} + \text{emissies overslag}$$

Met TEK : Totale ecologische kosten

Emissies_V : de kost van alle emissies uitgedrukt per tonkm voor het voorttransport

Emissies_H : de kost van alle emissies uitgedrukt per tonkm voor het hoofdtransport

Emissies_N : de kost van alle emissies uitgedrukt per tonkm voor het natransport

Emissies laden : de kost van de totale emissies van het in- en uitladen per ton

Emissies overslag : de kost van de totale emissies van de overslag per ton

Waardering emissies

In hoofdstuk vier, vijf en zes dienen we bovenvermelde functies te kwantificeren. Vandaar dat we nood hebben aan schattingen van de waarden van de verschillende emissies. Maibach et al. (2007) hebben hiertoe een poging gedaan. Hun resultaten voor België worden in onderstaande tabel 3.4 weergegeven.

Pollutant	Factor costs in €, 2000 prices, Unit: € 2000/t of pollutant						PM ₁₀ (non-exhaust)		
	NO _x	NMVOG	SO ₂	PM _{2.5} (exhaust)			HEATCO	UBA transferred to HEATCO ¹⁾	HEATCO
Source	CAFÉ CBA	CAFÉ CBA	CAFÉ CBA	HEATCO	UBA transferred to HEATCO ¹⁾	HEATCO/ CAFÉ CBA (for maritime)	HEATCO	UBA transferred to HEATCO ¹⁾	HEATCO
CAFÉ CBA sensitivity	VOLY median (PM/O3)	VOLY median (PM/O3)	VOLY median (PM/O3)						
Unit	€ 2000 (emissions 2010)	€ 2000 (emissions 2010)	€ 2000 (emissions 2010)	€ 2000	€ 2000	€ 2000	€ 2000	€ 2000	€ 2000
Local environment				Urban Metropolitan ²⁾	Urban ³⁾	Outside built-up areas	Urban metropolitan ²⁾	Urban ³⁾	Outside built-up areas
Belgium	5,200	2,500	11,000	422,200	136,200	91,100	169,900	54,500	36,500

Tabel 3.3 : Kosten luchtvervuiling uitgedrukt euro per ton, Maibach et al. (2007)

Verder hebben Maibach et al. gepoogd om op basis van deze waarderingen de externe kosten te berekenen van de uitstoot van verschillende type modi. We geven hieronder hun bevindingen weer voor het weg-, spoor- en binnenvaarttransport.

Vehicle	Size	EURO-Class	Metropolitan (€/t/vkm)	Urban (€/t/vkm)	Interurban (€/t/vkm)	Motorways (€/t/vkm)	Average (€/t/vkm)
Trucks	<7.5t	EURO-0	20.1	11.3	9.1	9.0	9.1
		EURO-1	12.0	6.7	5.4	5.3	5.4
		EURO-2	8.1	5.6	5.0	5.0	5.0
		EURO-3	7.5	4.8	4.0	3.9	4.0
		EURO-4	3.2	2.5	2.3	2.3	2.3
		EURO-5	2.3	1.6	1.4	1.4	1.4
	7.5-16t	EURO-0	28.2	15.7	11.9	11.1	11.6
		EURO-1	18.4	10.6	8.1	7.6	7.9
		EURO-2	12.4	8.5	7.2	6.9	7.1
		EURO-3	10.2	7.2	6.0	5.5	5.8
		EURO-4	5.3	4.1	3.5	3.3	3.4
		EURO-5	3.8	2.7	2.2	2.0	2.1
	16-32t	EURO-0	29.0	16.5	12.7	11.8	12.1
		EURO-1	16.3	9.9	7.8	7.3	7.5
		EURO-2	12.9	9.1	7.5	7.1	7.2
		EURO-3	9.4	7.0	5.8	5.3	5.5
		EURO-4	5.2	4.1	3.5	3.2	3.3
		EURO-5	3.8	2.7	2.2	2.0	2.1
	>32t	EURO-0	38.3	22.3	16.8	14.9	15.3
		EURO-1	28.1	16.1	12.0	10.6	10.9
EURO-2		18.9	13.2	10.7	9.6	9.8	
EURO-3		14.6	10.6	8.5	7.6	7.7	
EURO-4		7.4	6.1	5.1	4.5	4.6	
EURO-5		5.2	3.8	3.1	2.8	2.8	

Tabel 3.4 : Luchtvervuilingkosten van vrachtwagens, exclusief CO₂ en CO, uitgedrukt in prijzen 2000 per voertuigkilometer, Maibach et al. (2007)

			Metropolitan			Other Urban			Non Urban		
			Indirect emis.	Direct emis.	Total	Indirect emis.	Direct emis.	Total	Indirect emis.	Direct emis.	Total
			€/ct/ train-km	€/ct/ train-km	€/ct/ train-km	€/ct/ train-km	€/ct/ train-km	€/ct/ train-km	€/ct/ train-km	€/ct/ train-km	€/ct/ train-km
Freight	Electric	Locomotive	13.7	0.0	13.7	13.7	0.0	13.7	13.7	0.0	13.7
	Diesel	Locomotive	29.2	690.0	719.2	29.2	366.8	396.0	29.2	305.8	335.0

Tabel 3.5 : Luchtvervuilingskosten van vrachttreinen, exclusief CO₂ en CO, uitgedrukt in prijzen 2000 per voertuigkilometer, Maibach et al. (2007)

Ship Type	Direct Emissions €/ship-km
Dry Cargo <250 ton	0.89
Dry Cargo 250-400 ton	0.89
Dry Cargo 400-650 ton	1.22
Dry Cargo 650-1,000 ton	1.86
Dry Cargo 1,000-1,500 ton	2.54
Dry Cargo 1,500-3,000 ton	4.63
Dry Cargo > 3,000 ton	4.63
Push barge <250 ton	6.05
Push barge 250-400 ton	6.05
Push barge 400-650 ton	6.06
Push barge 650-1,000 ton	6.04
Push barge 1,000-1,500 ton	6.05
Push barge 1,500-3,000 ton	6.05
Push barge > 3,000 ton	12.60
Tanker <250 ton	0.89
Tanker 250-400 ton	0.90
Tanker 400-650 ton	1.22
Tanker 650-1,000 ton	1.86
Tanker 1,000-1,500 ton	2.54
Tanker 1,500-3,000 ton	7.28
Tanker > 3,000 ton	7.28

Tabel 3.6 : Luchtvervuilingskosten van binnenvaart, exclusief CO₂ en CO, uitgedrukt in prijzen 2000 per voertuigkilometer, Maibach et al. (2007)

Vehicle	Size	EURO-Class	Metropo-	Urban	Interurban	Motorways	Average
			litan				
			(€ct/vkm)	(€ct/vkm)	(€ct/vkm)	(€ct/vkm)	(€ct/vkm)
Trucks	<7.5t	EURO-0	1.3 (0.4-2.4)	1.3 (0.4-2.4)	1.2 (0.3-2.2)	1.2 (0.3-2.1)	1.2 (0.3-2.2)
		EURO-1	1.1 (0.3-2)	1.1 (0.3-2)	1 (0.3-1.9)	1 (0.3-1.9)	1 (0.3-1.9)
		EURO-2	1.1 (0.3-1.9)	1.1 (0.3-1.9)	1 (0.3-1.8)	1 (0.3-1.8)	1 (0.3-1.8)
		EURO-3	1.1 (0.3-2.1)	1.1 (0.3-2)	1.1 (0.3-1.9)	1.1 (0.3-1.9)	1.1 (0.3-1.9)
		EURO-4	1.1 (0.3-1.9)	1.1 (0.3-1.9)	1 (0.3-1.8)	1 (0.3-1.8)	1 (0.3-1.8)
		EURO-5	1.1 (0.3-2)	1.1 (0.3-2)	1 (0.3-1.8)	1 (0.3-1.8)	1 (0.3-1.8)
	7.5-16t	EURO-0	2 (0.6-3.7)	2 (0.6-3.7)	1.8 (0.5-3.2)	1.7 (0.5-3)	1.7 (0.5-3.1)
		EURO-1	1.8 (0.5-3.2)	1.7 (0.5-3.1)	1.6 (0.4-2.8)	1.5 (0.4-2.6)	1.5 (0.4-2.7)
		EURO-2	1.7 (0.5-3)	1.7 (0.5-3)	1.5 (0.4-2.7)	1.4 (0.4-2.6)	1.5 (0.4-2.6)
		EURO-3	1.8 (0.5-3.2)	1.8 (0.5-3.2)	1.6 (0.4-2.8)	1.5 (0.4-2.6)	1.5 (0.4-2.7)
		EURO-4	1.6 (0.5-3)	1.6 (0.5-2.9)	1.5 (0.4-2.6)	1.4 (0.4-2.5)	1.4 (0.4-2.5)
		EURO-5	1.7 (0.5-3)	1.7 (0.5-3)	1.5 (0.4-2.7)	1.4 (0.4-2.5)	1.4 (0.4-2.6)
	16-32t	EURO-0	2 (0.6-3.7)	2 (0.6-3.7)	1.8 (0.5-3.2)	1.7 (0.5-3)	1.7 (0.5-3.1)
		EURO-1	1.8 (0.5-3.2)	1.8 (0.5-3.2)	1.6 (0.4-2.8)	1.5 (0.4-2.6)	1.5 (0.4-2.7)
		EURO-2	1.7 (0.5-3)	1.7 (0.5-3)	1.5 (0.4-2.7)	1.4 (0.4-2.5)	1.4 (0.4-2.6)
		EURO-3	1.8 (0.5-3.2)	1.8 (0.5-3.2)	1.6 (0.4-2.8)	1.5 (0.4-2.6)	1.5 (0.4-2.7)
		EURO-4	1.6 (0.5-3)	1.6 (0.5-2.9)	1.5 (0.4-2.6)	1.4 (0.4-2.4)	1.4 (0.4-2.5)
		EURO-5	1.7 (0.5-3)	1.7 (0.5-3)	1.5 (0.4-2.7)	1.4 (0.4-2.5)	1.4 (0.4-2.5)
	>32t	EURO-0	2.9 (0.8-5.3)	2.9 (0.8-5.3)	2.5 (0.7-4.6)	2.3 (0.6-4.1)	2.3 (0.6-4.2)
		EURO-1	2.6 (0.7-4.7)	2.6 (0.7-4.7)	2.2 (0.6-4)	2 (0.6-3.6)	2 (0.6-3.7)
		EURO-2	2.5 (0.7-4.5)	2.5 (0.7-4.5)	2.2 (0.6-3.9)	2 (0.5-3.5)	2 (0.6-3.6)
EURO-3		2.6 (0.7-4.7)	2.6 (0.7-4.7)	2.2 (0.6-4)	2 (0.6-3.6)	2 (0.6-3.7)	
EURO-4		2.4 (0.7-4.3)	2.4 (0.7-4.3)	2.1 (0.6-3.7)	1.9 (0.5-3.3)	1.9 (0.5-3.4)	
EURO-5		2.5 (0.7-4.4)	2.4 (0.7-4.4)	2.1 (0.6-3.8)	1.9 (0.5-3.4)	1.9 (0.5-3.5)	

Tabel 3.7 : Luchtvervuilingkosten van CO₂ en CO van vrachtwagens, uitgedrukt in prijzen 2000 per voertuigkilometer, Maibach et al. (2007)

			Metropolitan			Other Urban			Non Urban		
			indirect emis.	direct emis.	total	indirect emis.	direct emis.	total	indirect emis.	direct emis.	total
			€ct/ train-km	€ct/ train-km	€ct/ train-km	€ct/ train-km	€ct/ train-km	€ct/ train-km	€ct/ train-km	€ct/ train-km	€ct/ train-km
Freight	Electric	Locomotive	30.7 (8.6-55.2)	0 (0-0)	30.7 (8.6-55.2)	30.7 (8.6-55.2)	0 (0-0)	30.7 (8.6-55.2)	30.7 (8.6-55.2)	0 (0-0)	30.7 (8.6-55.2)
	Diesel	Locomotive	5.6 (1.6-10.1)	29 (8.1-52.1)	34.6 (9.7-62.2)	5.6 (1.6-10.1)	28.9 (8.1-52.1)	34.6 (9.7-62.2)	5.6 (1.6-10.1)	28.9 (8.1-52.1)	34.6 (9.7-62.2)

Tabel 3.8 : Luchtvervuilingkosten van CO₂ en CO van vrachttreinen, uitgedrukt in prijzen 2000 per voertuigkilometer, Maibach et al. (2007)

Ship Type	Direct Emissions
	€/ship-km
Dry Cargo <250 ton	0.08 (0.02-0.15)
Dry Cargo 250-400 ton	0.08 (0.02-0.15)
Dry Cargo 400-650 ton	0.11 (0.03-0.2)
Dry Cargo 650-1,000 ton	0.17 (0.05-0.3)
Dry Cargo 1,000-1,500 ton	0.23 (0.07-0.42)
Dry Cargo 1,500-3,000 ton	0.42 (0.12-0.75)
Dry Cargo > 3,000 ton	0.42 (0.12-0.75)
Push barge <250 ton	0.56 (0.16-1)
Push barge 250-400 ton	0.56 (0.16-1)
Push barge 400-650 ton	0.56 (0.16-1)
Push barge 650-1,000 ton	0.56 (0.16-1)
Push barge 1,000-1,500 ton	0.56 (0.16-1)
Push barge 1,500-3,000 ton	0.56 (0.16-1)
Push barge > 3,000 ton	1.14 (0.32-2.05)
Tanker <250 ton	0.08 (0.02-0.15)
Tanker 250-400 ton	0.08 (0.02-0.15)
Tanker 400-650 ton	0.11 (0.03-0.2)
Tanker 650-1,000 ton	0.17 (0.05-0.3)
Tanker 1,000-1,500 ton	0.23 (0.07-0.42)
Tanker 1,500-3,000 ton	0.65 (0.18-1.18)
Tanker > 3,000 ton	0.65 (0.18-1.18)

Tabel 3.9 : Luchtvervuilingskosten van CO₂ en CO van binnenvaart, uitgedrukt in prijzen 2000 per voertuigkilometer, Maibach et al. (2007)

We dienen bij de bovenstaande tabellen wel op te merken dat de kostengegevens uitgedrukt worden in voertuigkilometers. Aangezien we bij de afleiding van de haalbaarheidsmodellen nood hebben aan variabele kostengegevens uitgedrukt per tonkm, zullen we bovenstaande gegevens dienen te delen door het getransporteerde gewicht in ton. Indien niet anders vermeldt, zullen we bij de berekening van de ecologische kosten in hoofdstuk vier, vijf en zes, gebruik maken van bovenvermelde gegevens.

3.5.3 : Sociaal-economisch vergelijkingscriterium

Het sociaal-economisch vergelijkingscriterium bestaat uit de optelsom van de totale logistieke kosten en de transportgerelateerde externe kosten. De totale logistieke kosten hebben we reeds in het vorige hoofdstuk behandeld. In deze paragraaf pogen we de totale externe kostenstructuur weer te geven van het uni- en multimodaal transport. Deze externaliteiten ontstaan wanneer de activiteiten of beslissingen van één bepaalde groep het welzijn en de welvaart van een andere groep beïnvloedt zonder hiervoor gecompenseerd te worden. We kunnen de transport gerelateerde externe kosten opsplitsen in congestie-, ongeval-, luchtvervuiling- en geluidsoverlastkosten.

Unimodaal transport

Goederen zullen van het vertrekpunt A getransporteerd worden naar hun eindbestemming B. Hierbij wordt enkel gebruik gemaakt van één specifieke modus. De totale externe kosten worden veroorzaakt

door deze modus en het in- en uitladen van de goederen. We kunnen de externe kostenstructuur als volgt weergeven:

$$TEXK = (\text{congestie} + \text{ongeval} + \text{luchtvervuiling} + \text{geluidoverlast}) \times \text{aantal km} + \text{laden}$$

Met TEXK : Totale externe kosten

Congestie : de totale externe kost van congestie per tonkm

Ongeval : de totale externe kost van ongevallen per tonkm

Luchtvervuiling : de totale externe kost van luchtvervuiling per tonkm

Geluidsoverlast : de totale externe kost van geluidsoverlast per tonkm

Aantal km : de totale afstand tussen A en B.

Laden : de totale externe kost van het in- en uitladen van goederen per ton

Multimodaal transport

Bij het multimodaal transport zal men gebruik maken van een specifieke combinatie van modi om de goederen te transporteren van A naar B. De totale externe kosten worden veroorzaakt door zowel de combinatie van modi, als het in- en uitladen en overslag van de goederen. De kostenstructuur kan als volgt weergegeven worden:

$$TEXK = \text{effecten}_V \times \text{aantal km voortransport} + \text{effecten}_H \times \text{aantal km hoofdtransport} \\ + \text{effecten}_N \times \text{aantal km natransport} + \text{effecten laden} + \text{effecten overslag}$$

Met TEXK : Totale externe kosten

Effecten_V : de totale externe kost voor het voortransport uitgedrukt per tonkm

Effecten_H : de totale externe kost voor het hoofdtransport uitgedrukt per tonkm

Effecten_N : de totale externe kost voor het natransport uitgedrukt per tonkm

Effecten laden : de totale externe kost van het in- en uitladen per ton

Effecten overslag : de totale externe kost van de overslag per ton

Waardering emissies

In hoofdstuk vier, vijf en zes dienen we bovenvermelde functies te kwantificeren. Vandaar dat we nood hebben aan schattingen van de waarden van de verschillende externe kosten voor de verschillende types modi. Maibach et al. (2007) hebben hiertoe een poging gedaan. Vooraleer we de resultaten weergeven willen we er nogmaals de aandacht op vestigen dat de kosten uitgedrukt worden per voertuigkilometer. Bij het gebruik van de haalbaarheidsmodellen dienen we deze gegevens te delen door het getransporteerde gewicht. We geven achtereenvolgens de congestie-, ongeval-, luchtvervuiling- en geluidsoverlastkosten weer.

Congestiekosten

Tabel 3.10 : Congestiekosten voor wegvervoer uitgedrukt in euro per voertuigkilometer, in prijzen 2000, Maibach et al. (2007)

Area and road type	Passenger cars			Goods vehicles			HGV
	Min.	Centr.	Max	Min.	Centr.	Max.	PCU
Large urban areas (> 2,000,000)							
Urban motorways	0.30	0.50	0.90	1.05	1.75	3.15	3.5
Urban collectors	0.20	0.50	1.20	0.50	1.25	3.00	2.5
Local streets centre	1.50	2.00	3.00	3.00	4.00	6.00	2
Local streets cordon	0.50	0.75	1.00	1.00	1.50	2.00	2
Small and medium urban areas (< 2,000,000)							
Urban motorways	0.10	0.25	0.40	0.35	0.88	1.40	3.5
Urban collectors	0.05	0.30	0.50	0.13	0.75	1.25	2.5
Local streets cordon	0.10	0.30	0.50	0.20	0.60	1.00	2
Rural areas							
Motorways*	0.00	0.10	0.20	0.00	0.35	0.70	3.5
Trunk roads*	0.00	0.05	0.15	0.00	0.13	0.23	2.5

vkm = vehicle-kilometre, HGV = Heavy Goods Vehicle, PCU = Passenger Car Unit.

* Calculated with a price elasticity of demand of -0.3.

Modus	Congestiekosten per vkm	Eenheid
Vrachttrein	0.2 €/treinkilometer	Euro per voertuigkilometer
Binnenvaart	Verwaarloosbaar	Euro per voertuigkilometer

Tabel 3.11 : Congestiekosten voor trein en binnenvaart uitgedrukt in euro per voertuigkilometer, in prijzen 2000, Maibach et al. (2007) p. 40

Ongevalkosten

	Passenger cars			Motor cycles			HDV		
	Urban roads	Motorways	Other roads	Urban roads	Motorways	Other roads	Urban roads	Motorways	Other roads
	€/vkm	€/vkm	€/vkm	€/vkm	€/vkm	€/vkm	€/vkm	€/vkm	€/vkm
Belgium	6.58 (-0.47-10.35)	0.47 (-0.78-0.78)	2.51 (-2.98-4.08)	48.43 (-2.98-138.25)	0.31 (-0.94-0.94)	8.62 (-17.4-24.45)	16.77 (-0.63-22.26)	0.47 (-0.47-0.47)	4.23 (-4.08-5.64)

Tabel 3.12 : Ongevalkosten voor wegvervoer uitgedrukt in eurocent per voertuigkilometer, in prijzen 2000, Maibach et al. (2007) p. 48

Modus	Ongevalkosten per vkm	Eenheid
Vrachttrein	0.08-0.3 €/treinkilometer	Euro per voertuigkilometer
Binnenvaart	Verwaarloosbaar	Euro per voertuigkilometer

Tabel 3.13 : Ongevalkosten voor trein en binnenvaart uitgedrukt in euro per voertuigkilometer, in prijzen 2000, Maibach et al. (2007) p.49

Luchtvervuilingkosten

Deze externe kosten komen overeen met het ecologische model. We verwijzen hier dan ook naar het onderdeel 3.5.2 van dit hoofdstuk.

Geluidsoverlastkosten

	Time of day	Urban	Suburban	Rural
Car	Day	0.76 (0.76 – 1.85)	0.12 (0.04 – 0.12)	0.01 (0.01 – 0.014)
	Night	1.39 (1.39 – 3.37)	0.22 (0.08 – 0.22)	0.03 0.01 – 0.03
MC	Day	1.53 (1.53 – 3.70)	0.24 (0.09 – 0.24)	0.03 (0.01 – 0.03)
	Night	2.78 (2.78 – 6.74)	0.44 (0.16 – 0.44)	0.05 (0.02 – 0.05)
Bus	Day	3.81 (3.81 – 9.25)	0.59 (0.21 – 0.59)	0.07 (0.03 – 0.07)
	Night	6.95 (6.95 – 16.84)	1.10 (0.39 – 1.10)	0.13 (0.06 – 0.13)
LGV	Day	3.81 (3.81 – 9.25)	0.59 (0.21 – 0.59)	0.07 (0.03 – 0.07)
	Night	6.95 (6.95 – 16.84)	1.10 (0.39 – 1.10)	0.13 (0.06 – 0.13)
HGV	Day	7.01 (7.01 – 17.00)	1.10 0.39 – 1.10	0.13 (0.06 – 0.13)
	Night	12.78 (12.78-30.98)	2.00 0.72 – 2.00	0.23 (0.11 – 0.23)
Passenger train	Day	23.65 (23.65 – 46.73)	20.61 10.43 – 20.61	2.57 (1.30 – 2.57)
	Night	77.99	34.40	4.29
Freight train	Day	41.93 (41.93 – 101.17)	40.06 20.68 – 40.06	5.00 (2.58 – 5.00)
	Night	171.06	67.71	8.45

Central values in bold, ranges in brackets.

Note: The lower limit of the bandwidth is based on dense traffic situations, while the upper limit is based on thin traffic situations. Central values (in bold) chosen based on the predominant traffic situation in the respective regional cluster: urban: dense; suburban/rural: thin.

Tabel 3.14 : Geluidsoverlastkosten van weg en spoorverkeer uitgedrukt in eurocent per voertuigkilometer, Maibach et al. (2007) p.73

3.5.4 : Energetisch vergelijkingscriterium

In dit model pogen we de energetische efficiëntie weer te geven van het uni- en multimodaal transport. De energetische efficiëntie wordt uitgedrukt in joule per ton, of simpelweg J/ton. Het energetisch efficiëntie model geeft het totaal aantal J/ton weer voor elk transportalternatief. Het alternatief met het laagste aantal J/ton is per definitie het energetisch efficiëntst. Aangezien de joule een kleine eenheid is, spreken we van MJ/ton.

Unimodaal transport

Goederen zullen van het vertrekpunt A getransporteerd worden naar hun eindbestemming B. Hierbij wordt enkel gebruik gemaakt van één specifieke modus. Zowel de vervoermodus als het in- en uitladen vergt energie. We kunnen het totaal aantal MJ/ton als volgt berekenen:

$$T.MJ = \text{verbruik MJ/tonkm} \times \text{aantal km} + \text{verbruik MJ/ton tijdens het laden}$$

Met T.MJ : Totale aantal MJ/ton

Aantal km : de totale afstand tussen A en B.

Multimodaal transport

Bij het multimodaal transport zal men gebruik maken van een specifieke combinatie van modi om de goederen te transporteren van A naar B. Het totaal aantal MJ/ton kan berekend worden op de volgende wijze:

$$\begin{aligned} T.MJ = & \text{verbruik MJ/tonkm}_V \times \text{aantal km voortransport} \\ & + \text{verbruik MJ/tonkm}_H \times \text{aantal km hoofdtransport} \\ & + \text{verbruik MJ/tonkm}_N \times \text{aantal km natransport} \\ & + \text{MJ/ton van laden} + \text{MJ/ton van overslag} \end{aligned}$$

Met T.MJ : Totale aantal MJ/ton

Verbruik MJ/tonkm_V : aantal MJ/tonkm voor het voortransport

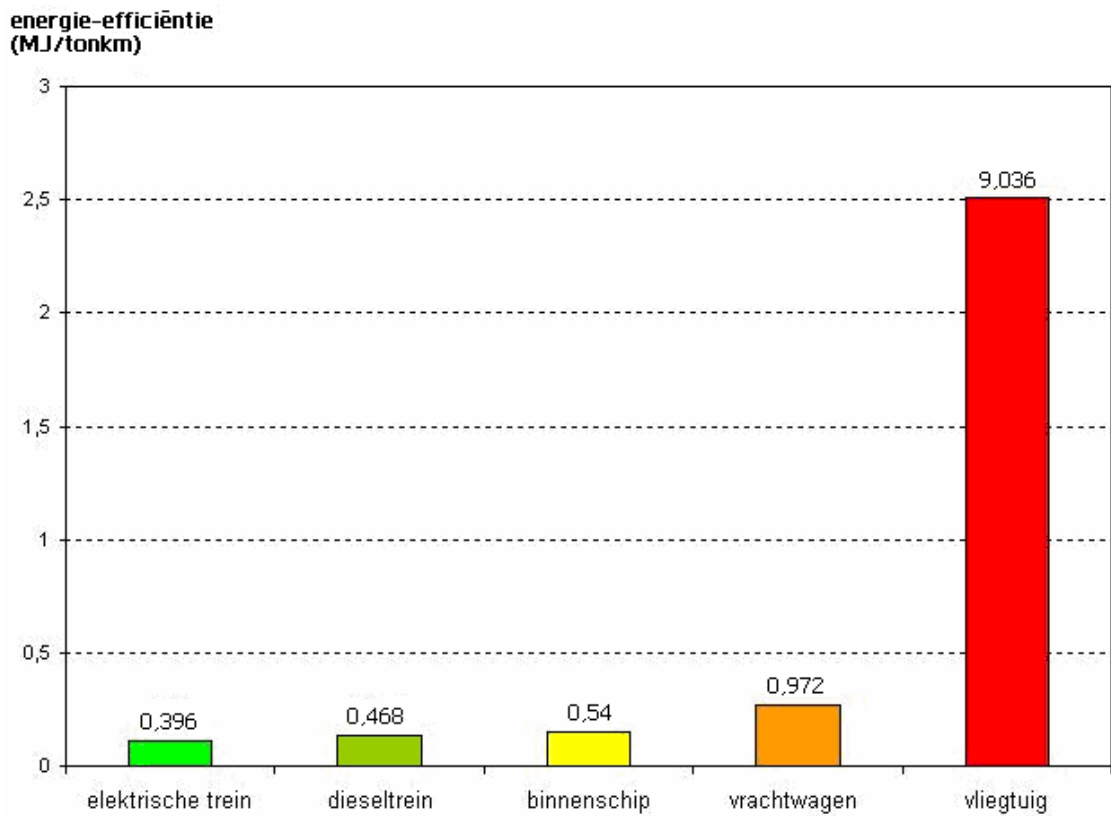
Verbruik MJ/tonkm_H : aantal MJ/tonkm voor het hoofdtransport

Verbruik MJ/tonkm_N : aantal MJ/tonkm voor het natransport

MJ/ton van laden : aantal MJ voor het in- uitladen per ton

MJ/ton van overslag : aantal MJ voor de overslag per ton

Waardering emissies



Figuur 3.10 : Energie-efficiënte van verschillende modi uitgedrukt per MJ/tonkm, De Geest et al. (2006) p.26

In tegenstelling tot het ecologisch en totaal externe kostenmodel, zijn de gegevens bij het energetische efficiëntie model wel uitgedrukt in tonkm. Dit betekent dan ook dat deze gegevens niet meer dienen omgevormd te worden.

Hoofdstuk 4 : Haalbaarheidsmodellen uitgaande van gelijke variabele kosten van het unimodaal transport en het multimodaal natransport

4.1 : Inleiding

In voorgaande hoofdstukken hebben we de verschillende relevante interne en externe kostenelementen onderzocht en hebben op basis van deze gegevens vier vergelijkingscriteria ontwikkeld, namelijk het economisch, sociaal-economisch, ecologisch en energetisch criterium. In zowel dit als het volgend hoofdstuk ontwikkelen wij analytische haalbaarheidsmodellen op basis van deze vergelijkingscriteria. Het verschil tussen de modellen die in dit hoofdstuk ontwikkeld worden en deze van het volgende hoofdstuk, ligt in het al dan niet aannemen van één veronderstelling, namelijk: de variabele kosten van het unimodaal transport zijn identiek aan die van het multimodaal natransport. In dit hoofdstuk nemen we deze veronderstelling aan, in het volgende hoofdstuk doen we dit niet.

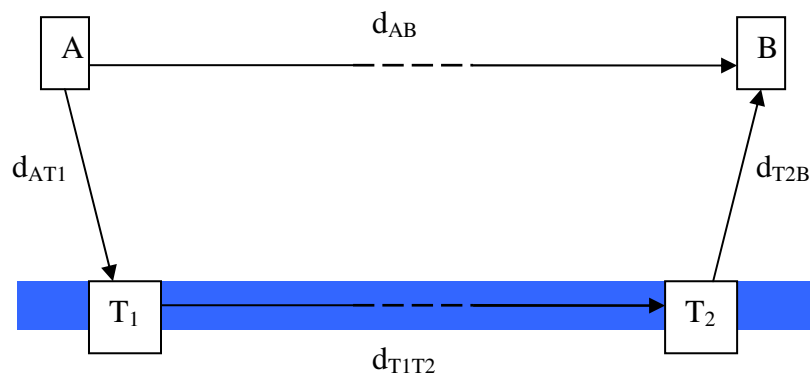
In dit hoofdstuk zullen we vier verschillende haalbaarheidsmodellen afleiden, met name het economisch, het ecologisch, het energetisch en het sociaal-economisch model. Het opzet van elk van deze modellen is om grafisch het gebied weer te geven waar een specifiek transporttraject, bijvoorbeeld een multimodaal traject, voordeliger is dan een ander mogelijk transportalternatief, bijvoorbeeld een unimodaal traject. In het economisch haalbaarheidsmodel zal dit gebied berekend worden op basis van het economische vergelijkingscriterium. Bij het ecologisch model zullen we enkel rekening houden met de ecologische kosten, die niet in rekenschap zijn genomen bij het economische model. Het energetisch model, dat gebaseerd is op het energetisch vergelijkingscriterium, gaat op zijn beurt na of men al dan niet energie kan besparen door een bepaald transport uit te voeren via een specifiek traject. Het sociaal-economische model gaat na of het op basis van zowel interne als externe kosten rendabeler is om een bepaald transport uit te voeren via een specifiek traject ten opzichte van een ander transportalternatief. Hierbij dienen we te vermelden dat de externe kost zowel uit ecologische als maatschappelijke kosten bestaat. Hoewel deze vier modellen elk gebruik maken van verschillende vergelijkingscriteria om de haalbaarheid van transporttrajecten te berekenen, worden ze alle vier op een analoge wijze afgeleid. Vandaar dat we in dit hoofdstuk eerst een algemeen haalbaarheidsmodel zullen afleiden, dat we daarna steeds aanpassen aan de vier specifieke modellen.

Vooraleer we van start gaan met de afleiding van het algemeen haalbaarheidsmodel, dienen we op te merken dat deze modellen slechts een benadering zijn van de werkelijkheid. Desalniettemin kunnen deze modellen helpen mogelijke transportdilemma's te identificeren en de besluitvormer de nodige inzichten geven om een verantwoorde transportkeuze te maken.

4.2 : Afleiding algemeen haalbaarheidsmodel

Hoewel de modellen die we in dit en het volgende hoofdstuk afleiden geldig zijn voor elke vergelijking tussen twee verschillende transportalternatieven ongeacht het traject en de combinaties van modi die hiertoe gebruikt worden, gaan wij bij de ontwikkeling van ons model uit van het volgende: we vergelijken een specifiek unimodaal transport met een specifiek multimodaal transport. Het unimodaal transport en het multimodaal voor- en natransport wordt uitgevoerd door het wegvervoer. Het multimodaal hoofdtransport wordt uitgeoefend door de binnenvaart. Deze concrete invulling zorgt voor de nodige verduidelijking tijdens de afleiding van de haalbaarheidsmodellen. Het doet echter geen afbreuk aan de algemene toepasbaarheid van deze modellen op elke combinatie van modi en transporttrajecten.

We veronderstellen dat goederen dienen getransporteerd te worden tussen onderneming A en eindbestemming B, waarbij A de verzendende partij en B de ontvangende partij is. Wanneer men kiest voor het unimodaal wegvervoer zullen de goederen rechtstreeks over de weg getransporteerd worden van A naar B waarbij de afstand gelijk is aan d_{AB} . Het multimodaal vervoer bestaat enerzijds uit het voor- en natransport en anderzijds uit het hoofdtransport. Het voortransport heeft plaats tussen onderneming A en terminal T_1 met een totale afstand van d_{AT1} . In terminal T_1 worden de goederen overgeslagen naar één of meerdere binnenschepen. De binnenvaart voert het hoofdtransport uit tussen de terminal T_1 en de terminal T_2 met een afstand van d_{T1T2} . Het laatste traject in het multimodaal vervoer is het natransport, welke plaatsvindt tussen terminal T_2 en eindbestemming B met een afstand van d_{T2B} . De volgende figuur geeft bovenvermelde informatie schematisch weer.



Figuur 4.1 : Voorstelling van twee transportalternatieven, namelijk het unimodaal (d_{AB}) en het multimodaal transport (d_{AT1} , d_{T1T2} , d_{T2B}), A is de verzendende partij vanwaar de goederen vertrekken en B is de eindbestemming van het transport, T_1 en T_2 zijn de overslagterminals die gebruikt worden bij het multimodale traject.

Symbool	Verklaring
d_{AB}	Afstand van A naar B in km

d_{AT1}	Afstand van A naar Terminal 1 in km
d_{T1T2}	Afstand van Terminal 1 naar Terminal 2 in km
d_{T2B}	Afstand van Terminal 2 naar B in km

Bij de ontwikkeling van het model gaan we er vanuit dat onderneming A op een welbepaalde afstand ligt van terminal T_1 . Met behulp van de in hoofdstuk twee en drie besproken kostenfuncties, berekenen we de transportkost van zowel het unimodaal als het multimodaal transport. Daarna zullen we aan de hand van de constructie van breakeven hyperbolen bepalen in welke zone de eindbestemming B gelegen dient te zijn opdat het multimodaal vervoer rendabel is ten opzichte van het rechtstreeks wegvervoer.

We dienen eerst een vergelijking op te stellen van de transportkost van zowel het unimodaal als het multimodaal transport. We zullen hierbij zowel de variabele als de vaste kostenelementen samen bundelen tot één variabele en één vast kostenelement. Aldus bekomen we voor het **unimodaal wegvervoer** de volgende uitdrukking.

$$T.K.U = C_{AB} \times d_{AB} + C_U$$

Symbol	Verklaring
T.K.U	Totale transportkost unimodaal wegvervoer in EUR/ton
C_{AB}	Variabele transportkost unimodaal wegvervoer in EUR/tonkm
d_{AB}	Afstand van onderneming A naar eindbestemming B over de weg in km
C_W	Vaste transportkost unimodaal wegvervoer in EUR/ton

Aangezien het **multimodaal vervoer** bestaat uit enerzijds het voor- en natransport en anderzijds het hoofdtransport, zullen we de totale transportkosten van het multimodaal vervoer als volgt weergeven.

$$T.K.M = T.K.V + T.K.H + T.K.N$$

$$T.K.V = C_{AT1} \times d_{AT1} + C_V$$

$$T.K.H = C_{T1T2} \times d_{T1T2} + C_H$$

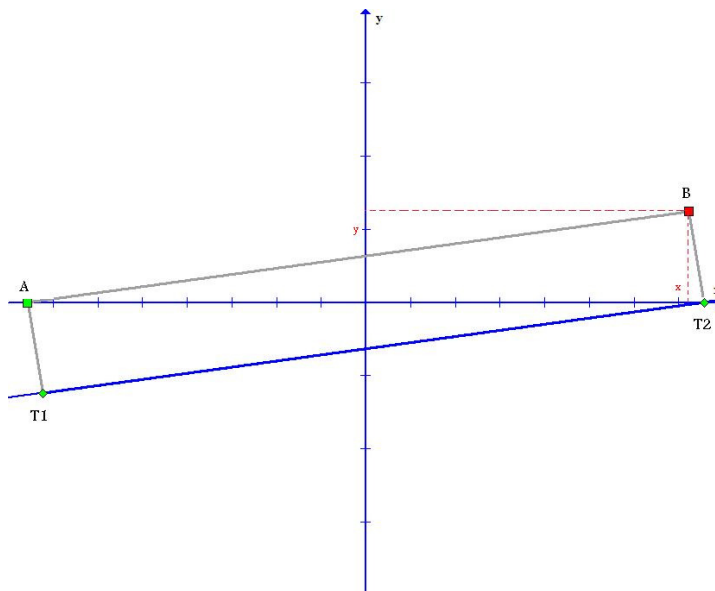
$$T.K.N = C_{T2B} \times d_{T2B} + C_N$$

Symbolen	Verklaring
T.K.M	Totale transportkost multimodaal vervoer in EUR/ton
T.K.V	Totale kost van voortransport in EUR/ton

T.K.H	Totale kost van hoofdtransport in EUR/ton
T.K.N	Totale kost van natransport in EUR/ton
C_{AT1}	Variabele kost voortransport in EUR/tonkm
C_{T1T2}	Variabele kost hoofdtransport in EUR/tonkm
C_{T2B}	Variabele kost natransport in EUR/tonkm
d_{AT1}	Afstand van onderneming A naar Terminal 1 in km
d_{T1T2}	Afstand van Terminal 1 naar Terminal 2 in km
d_{T2B}	Afstand van Terminal 2 naar eindbestemming B in km
C_V	Vaste kost voortransport in EUR/ton
C_H	Vaste kost hoofdtransport in EUR/ton
C_N	Vaste kost natransport in EUR/ton

Het doel van het model is het weergeven van de breakeven hyperbool. Deze bakent een gebied af waarbinnen de eindbestemming B gelegen dient te zijn zodat het multimodaal vervoer minstens even voordelig is dan het unimodaal wegvervoer. Om tot deze hyperbool te komen, dienen we eerst de totale transportkost van het rechtstreeks wegvervoer gelijk te stellen aan de totale kost van het multimodaal vrachtvervoer. Wel dient opgemerkt te worden dat we in dit model het natransport als kritische kostencomponent beschouwen in de multimodale transportketen.

Om de rendabele regio weer te geven waarbinnen eindbestemming B moet gelegen zijn, voeren we een plaatsoord in. Om tot eenvoudige formules te komen, kiezen we de x-as als de verbindinglijn tussen onderneming A en terminal T_2 en de y-as als middelloodlijn van het lijnstuk d_{AT2} waardoor het in twee gelijke helften wordt verdeeld. We bekommen de volgende voorstelling.



Figuur 4.2 : Voorstelling van beide vervoersalternatieven, met name het unimodaal wegvervoer en het multimodaal vervoer, de x-as is de verbindinglijn tussen onderneming A en terminal T_2 en de y-as is de middelloodlijn van het lijnstuk d_{AT2} zodat de laatste in twee gelijke helften verdeeld wordt

We dienen de breakeven afstand te berekenen. Dit doen we door de totale transportkosten van het unimodaal wegvervoer gelijk te stellen aan de totale transportkosten van het multimodaal vervoer. We krijgen dan de volgende vergelijking.

$$T.K.U = T.K.M$$

$$T.K.U = T.K.V + T.K.H + T.K.N$$

$$d_{AB} \times C_{AB} + C_U = d_{AT1} \times C_{AT1} + C_V + d_{T1T2} \times C_{T1T2} + C_H + d_{T2B} \times C_{T2B} + C_N$$

Aangezien het de bedoeling is om het geografisch gebied weer te geven waarbinnen de eindbestemming B zich moet bevinden opdat het multimodaal vervoer rendabeler is dan het direct wegvervoer, zal de eindbestemming B de veranderlijke coördinaten x en y toegekend krijgen. Dit impliceert dat zowel de locatie van terminal T_1 als van terminal T_2 als vast aanzien worden, mede door het feit dat de geografische verspreiding van de bestaande terminals een snelle overschakeling niet toelaten. Aangezien de eindbestemming B als enige veranderlijke coördinaten heeft, zullen de afstanden d_{AB} en d_{T2B} de enige veranderlijke lengtes zijn in dit model. Het gevolg hiervan is dat de kosten van zowel het voor- als het hoofdtransport in het model als ook de vaste kosten van het unimodaal- en natransport als een constante term, aangeduid met het symbool C , beschouwd mogen worden. Indien we bovenstaande bevindingen in ons analytisch model introduceren bekommen we :

$$d_{AB} \times C_{AB} = d_{T2B} \times C_{T2B} + C$$

$$C = \text{constante} = d_{AT1} \times C_{AT1} + C_V + d_{T1T2} \times C_{T1T2} + C_H + C_N - C_W$$

Als we de variabele elementen naar het linkerlid overbrengen en de vergelijking delen door C_{AB} , bekommen we de volgende uitdrukking.

$$d_{AB} - d_{T2B} \times \frac{C_{T2B}}{C_{AB}} = K$$

$$K = \frac{C}{C_{AB}} = \text{constante}$$

Zoals we reeds eerder vermeld hebben, gaan we in dit hoofdstuk er vanuit dat $C_{T2B} = C_{AB}$. Deze stelling kan op de volgende manier geïnterpreteerd worden: de totale variabele transportkost voor het unimodaal vervoer is gelijk aan de totale variabele transportkost van het natransport. Hoewel deze veronderstelling in de meeste gevallen niet realistisch is, laat het ons wel toe de verdere berekeningen

te vergemakkelijken en kunnen we, na de nodige berekeningen, een breakeven hyperbool construeren. In hoofdstuk vijf gaan we uit van de meer realistische veronderstelling, namelijk dat $C_{T2B} \neq C_{AB}$.

Aangezien we uitgaan van de stelling $C_{T2B} = C_{AB}$, kunnen we bovenstaande vergelijking vereenvoudigen tot de volgende uitdrukking.

$$d_{AB} - d_{T2B} = K \quad (1)$$

Vervolgens herleiden we de afstanden d_{AB} en d_{T2B} naar hun x en y coördinaten. Dit doen we door middel van de stelling van Pythagoras toe te passen op figuur 4.2. We bekommen de volgende vergelijkingen:

$$\begin{aligned} d_{AB}^2 &= [x + |x_A|]^2 + [y - y_A]^2 \\ d_{T2B}^2 &= [x - x_{T2}]^2 + [y - y_{T2}]^2 \end{aligned}$$

Aangezien de y-as fungeert als een middelloodlijn van het lijnstuk $[A, T_2]$, kunnen we concluderen dat $x_{T2} = |x_A|$. Daarenboven kunnen we van de figuur afleiden dat y_A en y_{T2} gelijk moeten zijn aan nul, omdat beide punten op de x-as gelegen zijn. We bekommen de volgende vergelijkingen:

$$\begin{aligned} d_{AB}^2 - d_{T2B}^2 &= [x + |x_A|]^2 + y^2 - [x - |x_A|]^2 - y^2 \\ d_{AB}^2 - d_{T2B}^2 &= 4x|x_A| \end{aligned} \quad (2)$$

Bovenvermelde vergelijking heeft drie onbekende variabelen. We vormen vergelijking (1) om tot onderstaande om zo het aantal onbekenden te verminderen en een verband te vinden tussen veranderlijken y en x.

$$\begin{aligned} [d_{AB}]^2 &= [K + d_{T2B}]^2 \\ d_{AB}^2 &= K^2 + 2Kd_{T2B} + d_{T2B}^2 \\ d_{AB}^2 - d_{T2B}^2 &= K^2 + 2Kd_{T2B} \end{aligned} \quad (3)$$

Indien we vergelijking (3) gelijkstellen aan vergelijking (2) bekommen we de volgende gelijkheid.

$$\begin{aligned} \rightarrow 4x|x_A| &= K^2 + 2d_{T2B}K \\ \rightarrow d_{T2B} &= \frac{4x|x_A|}{2K} - \frac{K^2}{2K} \end{aligned}$$

We hebben nu een vergelijking met twee onbekenden, namelijk d_{T2B} en x , maar nog steeds geen verband tussen veranderlijken x en y . We substitueren nu d_{T2B} met zijn Pythagoras vergelijking.

$$d_{T2B}^2 = [x - |x_A|]^2 + y^2$$
$$[x - |x_A|]^2 + y^2 = \left[\frac{2x|x_A|}{K} - \frac{K}{2} \right]^2$$

Deze laatste vergelijking werken we verder uit:

$$\rightarrow [x - |x_A|]^2 + y^2 = \left[\frac{2x|x_A|}{K} - \frac{K}{2} \right]^2$$
$$\rightarrow x^2 + x_A^2 - 2x|x_A| + y^2 = \frac{4x^2x_A^2}{K^2} + \frac{K^2}{4} - 2x|x_A|$$
$$\rightarrow x^2 \frac{[K^2 - 4x_A^2]}{K^2} + y^2 = \frac{K^2 - 4x_A^2}{4}$$
$$\rightarrow 4x^2 \frac{[K^2 - 4x_A^2]}{K^2[K^2 - 4x_A^2]} + \frac{4y^2}{K^2 - 4x_A^2} = 1$$
$$\Rightarrow \left[\frac{2x}{K} \right]^2 + \left[\frac{2y}{\sqrt{K^2 - 4x_A^2}} \right]^2 = 1$$

Deze laatste is een vergelijking van een hyperbool. Dit kunnen we beter zien als we gebruik maken van parameter α en β .

$$\alpha = \frac{K}{2}$$
$$\beta = \frac{\sqrt{4x_A^2 - K^2}}{2}$$

We verkrijgen dan de volgende gelijkheid:

$$\rightarrow \left[\frac{x}{\alpha} \right]^2 - \left[\frac{y}{\beta} \right]^2 = 1$$

$$\rightarrow y = \pm \beta \sqrt{\left[\frac{x}{\alpha} \right]^2 - 1}$$

Deze laatste vergelijking stelt ons in staat om de hyperbool te tekenen, aangezien we voor elke x waarde een overeenstemmende y waarde verkrijgen. We zullen nu mathematisch aantonen dat de gezochte meetkundige plaats overeenstemt met het rechter deel van de hyperbool.

$$C_{AB} \times \sqrt{(x + |x_A|)^2 + y^2} = C + C_{AB} \sqrt{(x - |x_A|)^2 + y^2}$$

We kwadrateren beide leden en na het herleiden bekomen de volgende uitdrukking:

$$C^2 - 4|x_A|C_{AB}^2 x = 2CC_{AB} \sqrt{(x - |x_A|)^2 + y^2}$$

Opnieuw kwadrateren we beide leden en na herschrijving bekomen we het volgende:

$$4C_{AB}^2 (4x_A^2 C_{AB}^2 - C^2) x^2 - 4C_{AB}^2 C^2 y^2 = (4x_A^2 C_{AB}^2 - C^2) C^2$$

Als $4x_A^2 C_{AB}^2 - C^2 > 0$ of $2|x_A|C_{AB} > C$

Dan, na deling van beide leden door $(4x_A^2 C_{AB}^2 - C^2) C^2$ bekomen we:

$$\frac{x^2}{\left(\frac{C}{2C_{AB}} \right)^2} - \frac{y^2}{\left(\sqrt{x_A^2 - \left(\frac{C}{2C_{AB}} \right)^2} \right)^2} = 1$$

De gezochte meetkundige plaats is het rechterdeel van deze hyperbool, waar $x > 0$.

Indien we de hyperbool willen weergeven is het echter wel vereist dat $2x_A C_{AB} > C$ of anders uitgedrukt $2x_A > K$. Indien deze ongelijkheid niet geldt, zal er geen enkel punt zijn waar het multimodaal vervoer voordeliger is dan het rechtsreeks wegvervoer en kunnen we geen hyperbool tekenen. Dit laatste kunnen we concluderen uit de ongelijkheid aangezien $2x_A C_{AB}$ de kost is om met een vrachtwagen 1 ton van onderneming A naar terminal T_2 te brengen. Deze kost mag natuurlijk niet lager liggen dan van onderneming A naar terminal T_1 naar T_2 met het multimodaal vervoer.

We kunnen op eenvoudige wijze het **snijpunt** bepalen van de hyperbool met de positieve x-as. We dienen hiertoe de y-waarde gelijk te stellen aan nul. We bekomen het volgende snijpunt:

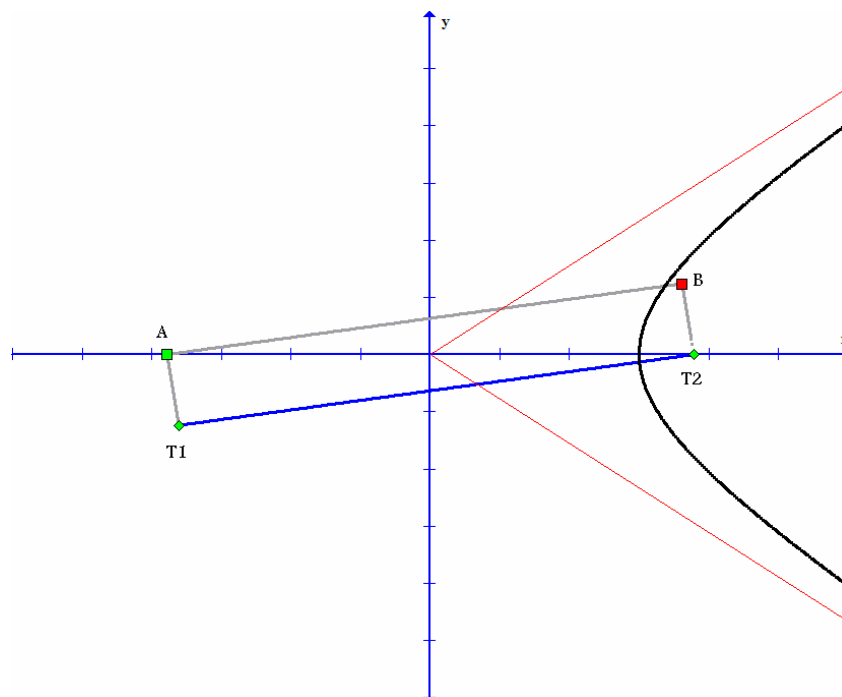
$$y = 0$$
$$x = \frac{C}{2C_{AB}} = \frac{K}{2}$$

De **brandpunten** van de hyperbool dienen uiteraard overeen te komen met de positie van onderneming A en terminal T₂:

$$y = 0 \rightarrow x = -x_A$$
$$y = 0 \rightarrow x = x_A$$

Naast de algemene vergelijking van de hyperbool berekenen we ook de **asymptoten**. Dit doen we door de vergelijking van de hyperbool gelijk te stellen aan nul in plaats van 1. De vergelijking van de asymptoot komt overeen met de volgende gelijkheid : $y = \pm \frac{\beta}{\alpha} x$.

Indien we grafisch deze hyperbool weergeven bekomen we de volgende figuur.



Figuur 4.3 : Voorstelling van de breakeven hyperbool (zwart) en asymptoten (rood). A is de verzendende onderneming en B is de eindbestemming. T1 en T2 zijn de overslagterminals. Indien B rechts ligt van de hyperbool dan is het voordeliger om de goederen te transporteren via het multimodale traject. Indien B links ligt, dan is het unimodale traject het voordeligst.

Met behulp van de parameters en de vergelijkingen van de hyperbool en asymptoten, kan men voor iedere situatie de breakeven hyperbool construeren. Wanneer de eindbestemming B zich aan de rechterkant bevindt van de hyperbool, kunnen we concluderen dat, uitgaande van de stelling $C_{T2B} = C_{AB}$, het rendabeler is om goederen te transporteren op de multimodale wijze dan volledig over de weg. Indien de eindbestemming B zich aan de linker kant bevindt van de hyperbool, dan zal het voordeliger zijn om de goederen te transporteren via de multimodale wijze.

Nu we het algemeen haalbaarheidsmodel hebben afgeleid, gaan we het toepassen op de vier verschillende modellen die we in 4.1 beschreven hebben. Aangezien de afleiding van de hyperbool en zijn asymptoten voor alle vier modellen overeenstemmen met het algemeen model, beperken wij ons tot het bespreken van de samenstelling van de algemene kostenparameters voor de verschillende modellen. We beginnen bij het economisch model.

4.3 : Economisch haalbaarheidsmodel met $C_{T2B} = C_{AB}$

We beginnen bij de afleiding van het economisch haalbaarheidsmodel bij het herleiden van de kosten van het unimodaal wegvervoer.

Unimodaal wegvervoer

Zoals reeds in 2.11.1 in hoofdstuk twee beschreven, zijn de totale economische transportkosten voor het unimodaal transport gelijk aan :

$$\begin{aligned} T.E.K.U = & (\text{directe transportkosten} + \text{in - transit voorraadkost} + \text{veiligheidsvoorraadkost}) \\ & \times \text{aantal kilometer} + \text{cycluskosten} + \text{bestel/administratie/verpakkin gskosten} \\ & + \text{instelkosten} + \text{goederenbehandelingkosten} + \text{vestigingsplaatskosten} \end{aligned}$$

Met het oog op de verdere analyse kunnen we best deze kostenfunctie vereenvoudigen door zowel alle variabele kostenelementen als alle vaste kosten elementen samen te bundelen in één variabele en één vast kostenelement. We bekommen dan de volgende uitdrukking:

$$T.E.K.U = C_{AB} \times d_{AB} + C_U$$

Symbol	Verklaring
T.E.K.U	Totale economische transportkost unimodaal wegvervoer in EUR/ton
C_{AB}	Variabele transportkost unimodaal wegvervoer in EUR/tonkm
d_{AB}	Afstand van onderneming A naar B over de weg in km
C_U	Vaste transportkost unimodaal wegvervoer in EUR/ton

We vervolgen de afleiding van het economisch haalbaarheidsmodel door het herleiden van de economische kosten van het multimodaal traject.

Multimodaal vervoer

Zoals reeds hierboven vermeld zijn de totale economische transportkosten voor het multimodaal vervoer gelijk aan:

$$T.E.K.M = T.E.K.V + T.E.K.H + T.E.K.N$$

Zoals reeds vermeld in 2.11.2 in hoofdstuk twee is de kostenstructuur van zowel het voor- als het natransport analoog aan deze van het unimodaal transport met de uitzondering op de cyclusvoorraadkosten, de verpakkingskosten, de order- en administratiekosten en de instelkosten. De zojuist opgesomde kosten dienen niet opgenomen te worden in de logistieke kostenfuncties van het voor- en natransport. De kostenstructuur van het hoofdtransport kunnen we als volgt weergeven:

$$T.E.K.H = (\text{directe transportkost} + \text{in transit voorraadkost} + \text{veiligheidsvoorraadkost}) \\ \times \text{aantal kilometer hoofdtransport} + \text{cycluskosten} + \text{overslagkosten} + \text{instelkosten} \\ + \text{bestel/administratie/verpakkingskosten} + \text{vestigingsplaatskost}$$

Op dezelfde manier zoals we bij het unimodaal wegvervoer gedaan hebben, gaan we deze kostenfuncties vereenvoudigen door zowel alle variabele kostenelementen als alle vaste kosten elementen samen te bundelen in één variabele en één vast kostenelement. Op die manier bekomen we de volgende uitdrukking:

$$T.E.K.V = C_{AT1} \times d_{AT1} + C_V$$

$$T.E.K.H = C_{T1T2} \times d_{T1T2} + C_H$$

$$T.E.K.N = C_{T2B} \times d_{T2B} + C_N$$

$$T.E.K.M = T.E.K.V + T.E.K.H + T.E.K.N$$

Symbolen	Verklaring
T.E.K.M	Totale economische transportkost multimodaal vervoer in EUR/ton
T.E.K.V	Totale economische kost van voortransport in EUR/ton
T.E.K.H	Totale economische kost van hoofdtransport in EUR/ton
T.E.K.N	Totale economische kost van natransport in EUR/ton
C_{AT1}	Variabele kost voortransport in EUR/tonkm
C_{T1T2}	Variabele kost hoofdtransport in EUR/tonkm
C_{T2B}	Variabele kost natransport in EUR/tonkm
d_{AT1}	Afstand van onderneming A naar Terminal 1 in km
d_{T1T2}	Afstand van Terminal 1 naar Terminal 2 in km
d_{T2B}	Afstand van Terminal 2 naar eindbestemming B in km
C_V	Vaste kost voortransport in EUR/ton
C_H	Vaste kost hoofdtransport in EUR/ton
C_N	Vaste kost natransport in EUR/ton

Om de economisch haalbaarheidshyperbool te berekenen, volstaat het de bovenstaande elementen in te vullen in de formules van het algemeen haalbaarheidmodel.

4.4 : Sociaal-economisch haalbaarheidsmodel met $C_{T2B} = C_{AB}$

In het economisch haalbaarheidsmodel wordt de breakeven hyperbool berekend door het gelijkstellen van de totale som van economische kostenelementen van enerzijds het unimodaal wegvervoer en anderzijds het multimodaal vervoer. Hierbij wordt er echter geen rekening gehouden met de externe kosten, waardoor we een vertekend beeld krijgen van het breakeven gebied. Bij de sociaal-economische analyse worden de externe kosten geïnternaliseerd zodat we inzicht krijgen in de 'totale gemeenschapskost' van de twee vervoersmogelijkheden.

Bij het sociaal-economisch model kunnen we, net zoals bij het economisch model, een breakeven hyperbool en asymptoten creëren. Aangezien deze op een analoge wijze worden berekend, gaan we niet dieper op de afleiding in. Het enige verschil tussen de twee modellen is de integratie van externe kosten. Door deze internalisering zullen zowel de variabele als de constante transportkosten van elke modus hoger liggen in het sociaal-economisch model ten opzichte van het economisch model. Voor het **unimodaal transport** verkrijgen we de volgende algemene uitdrukking:

$$T.S.K.U = T.E.K.U + T.EX.K.U$$

Symbol	Verklaring
T.S.K.U	Totale sociale economische transportkost unimodaal wegvervoer in EUR/ton
T.E.K.U	Totale economische transportkost unimodaal wegvervoer in EUR/ton
T.EX.K.U	Totale externe transportkost unimodaal wegvervoer in EUR/ton

De samenstellende delen van de externe transportkost van het unimodaal transport hebben we in het onderdeel 3.5.3 van hoofdstuk drie bepaald. Voor de afleiding van het sociaal-economisch haalbaarheidsmodel vervangen we bovenstaande uitdrukking door de volgende vergelijking:

$$T.S.K.U = C_{AB} \times d_{AB} + C_U$$

Symbol	Verklaring
T.S.K.U	Totale sociale economische transportkost unimodaal wegvervoer in EUR/ton
C_{AB}	Variabele transportkost unimodaal wegvervoer incl. externe kosten in EUR/tonkm
d_{AB}	Afstand van onderneming A naar eindbestemming B over de weg in km
C_U	Vaste transportkost unimodaal wegvervoer incl. externe kosten in EUR/ton

Merk op dat bij deze vergelijking niet enkel de variabele kost wijzigt door de integratie van de externe kosten, maar ook de vaste transportkosten. Bij de volgende vergelijking, namelijk die van de totale sociale transportkosten van **multimodaal vervoer**, wijzigt zowel de variabele kosten C_{AT1} , C_{T1T2} , C_{T2B} als de vaste kosten C_V , C_H en C_N .

$$T.S.K.M = T.E.K.M + T.EX.K.M$$

$$T.S.K.M = \underbrace{d_{AT1} \times C_{AT1} + C_V}_{T.S.K.V} + \underbrace{d_{T1T2} \times C_{T1T2} + C_H}_{T.S.K.H} + \underbrace{d_{T2B} \times C_{T2B} + C_N}_{T.S.K.N}$$

Symbolen	Verklaring
T.S.K.M	Totale sociale economische transportkost multimodaal vervoer in EUR/ton
T.E.K.M	Totale economische transportkost multimodaal vervoer in EUR/ton
T.EX.K.M	Totale externe transportkost multimodaal vervoer in EUR/ton
T.S.K.V	Totale sociale kost van voortransport in EUR/ton
T.S.K.H	Totale sociale kost van hoofdtransport in EUR/ton
T.S.K.N	Totale sociale kost van natransport in EUR/ton
C_{AT1}	Variabele kost voortransport in EUR/tonkm
C_{T1T2}	Variabele kost hoofdtransport in EUR/tonkm
C_{T2B}	Variabele kost natransport in EUR/tonkm
d_{AT1}	Afstand van onderneming A naar Terminal 1 in km

d_{T1T2}	Afstand van Terminal 1 naar Terminal 2 in km
d_{T2B}	Afstand van Terminal 2 naar eindbestemming B in km
C_V	Vaste kost voortransport in EUR/ton
C_H	Vaste kost hoofdtransport in EUR/ton
C_N	Vaste kost natransport in EUR/ton

Om de sociaal-economisch haalbaarheidshyperbool en bijhorende asymptoten te berekenen, volstaat het de bovenstaande elementen in te vullen in de formules van het algemeen haalbaarheidmodel.

4.5 : Ecologisch haalbaarheidsmodel met $C_{T2B} = C_{AB}$

We dienen de kostenelementen van zowel het unimodaal als multimodaal vervoer te herleiden naar een eenvoudigere vorm. We beginnen bij de kostenstructuur van het unimodaal wegvervoer.

Voor het **unimodaal transport** bekwamen we in het onderdeel '3.5.2 : Ecologisch vergelijkingscriterium' in hoofdstuk drie de volgende kostenfunctie:

$$T.EC.K.U = (\text{additieven} + CO_2 + NO_x + CO + SO_2 + (NM)VOS) \times \text{aantal km} + \text{laden}$$

Symbolen	Verklaring
T.EC.K.U	Totale ecologische kosten unimodaal transport
Additieven	De kost van de uitstoot van additieven per tonkm
CO ₂	De kost van de uitstoot van koolstofdioxide per tonkm
NO _x	De kost van de uitstoot van stikstofoxide per tonkm
CO	De kost van de uitstoot van koolstofoxide per tonkm
SO ₂	De kost van de uitstoot van zwaveldioxide per tonkm
(NM)VOS	De kost van de uitstoot van vluchtige organische stoffen per tonkm
Aantal km	De totale afstand tussen A en B
Laden	De kost van de uitstoot tijdens het in- en uitladen van goederen per ton

De variabele kosten worden uitgedrukt in € per tonkm en de vaste kosten in € per ton. Met het oog op de verdere analyse, vereenvoudigen we deze kostenfunctie door zowel alle variabele als alle vaste kostenelementen samen te bundelen in één variabel en één vast kostenelement. Aldus bekomen we de volgende uitdrukking:

$$T.EC.K.U = C_{AB} \times d_{AB} + C_U$$

Symbol	Verklaring
T.EC.K.U	Totale ecologische kost unimodaal wegvervoer in EUR/ton
C_{AB}	Variabele ecologische kost unimodaal wegvervoer in EUR/tonkm
d_{AB}	Afstand van onderneming A naar eindbestemming B over de weg in km
C_U	Vaste ecologische kost unimodaal wegvervoer in EUR/ton

Het voor- en natransport van het multimodaal vervoer heeft dezelfde kostenstructuur als die van het unimodaal wegvervoer. Voor het **hoofdtransport van het multimodaal transport** bekwamen we in hoofdstuk drie de volgende ecologische kostenstructuur.

$$T.EC.K.H = (\text{additieven} + CO_2 + NO_x + CO + SO_2 + (NM) VOS) \times \text{aantal km} \\ + \text{overslag}$$

Zoals bij de ecologische kosten van het wegvervoer worden de variabele kosten uitgedrukt in € per tonkm en de vaste kosten in € per ton. We vereenvoudigen deze kostenfunctie met het oog op de verdere analyse. Zodoende bekomen we de volgende uitdrukking.

$$T.EC.K.H = C_{T1T2} \times d_{T1T2} + C_H$$

Symbol	Verklaring
T.EC.K.H	Totale ecologische kost van het hoofdtransport in EUR/ton
C_{T1T2}	Variabele ecologische kost hoofdtransport in EUR/tonkm
d_{T1T2}	Afstand van terminal T_1 naar terminal T_2 over de waterweg in km
C_H	Vaste ecologische kost hoofdtransport vervoer in EUR/ton

De **totale ecologische kost van het multimodaal transport** is de optelsom van de ecologische kost van het voor- en natransport en het hoofdtransport. Zo bekomen we de volgende kostenfunctie.

$$T.EC.K.M = \underbrace{d_{AT1} \times C_{AT1} + C_V}_{\text{voortransport}} + \underbrace{d_{T1T2} \times C_{T1T2} + C_H}_{\text{hoofdtransport}} + \underbrace{d_{T2B} \times C_{T2B} + C_N}_{\text{natransport}}$$

Om de ecologische haalbaarheidshyperbool te berekenen, volstaat het de bovenstaande elementen in te vullen in de formules van het algemeen haalbaarheidmodel.

4.6 : Energetisch haalbaarheidsmodel met $C_{T2B} = C_{AB}$

We dienen de kostenelementen van zowel het unimodaal als multimodaal vervoer te herleiden naar een eenvoudigere vorm. Voor het **unimodaal wegvervoer** bekwamen we in het onderdeel '3.5.4 : Energetisch vergelijkingscriterium' in het derde hoofdstuk de volgende kostenfunctie:

$$T.EN.K.U = \text{verbruik MJ per tonkm} \times \text{aantal km} + \text{verbruik MJ per ton tijdens laden}$$

De variabele kosten worden uitgedrukt in kilowattuur per tonkm en de vaste kosten in kilowattuur per ton. We vereenvoudigen bovenvermelde uitdrukking met het oog op de verdere analyse. We bekommen de volgende uitdrukking:

$$T.EN.K.U = C_{AB} \times d_{AB} + C_U$$

Symbol	Verklaring
T.EN.K.U	Totale energetische kost unimodaal wegvervoer in kWh/ton
C_{AB}	Variabele energetische kost unimodaal wegvervoer in kWh/tonkm
d_{AB}	Afstand van onderneming A naar eindbestemming B over de weg in km
C_U	Vaste energetische kost unimodaal wegvervoer in kWh/ton

Het voor- en natransport van het multimodaal vervoer heeft dezelfde kostenstructuur als die van het unimodaal wegvervoer. Voor het **hoofdtransport van het multimodaal transport**, bekwamen we de volgende energetische kostenstructuur.

$$T.EN.K.H = \text{verbruik MJ per tonkm} \times \text{aantal km} + \text{verbruik MJ per ton tijdens overslag}$$

Zoals bij de energetische kosten van het wegvervoer worden de variabele kosten uitgedrukt in kWh per tonkm en de vaste kosten in kWh per ton. We passen dezelfde vereenvoudiging toe als bij het wegtransport. Aldus bekommen we de volgende uitdrukking.

$$T.EN.K.H = C_{T1T2} \times d_{T1T2} + C_H$$

Symbol	Verklaring
T.EN.K.H	Totale energetische kost van het hoofdtransport in kWh/ton
C_{T1T2}	Variabele energetische kost van het hoofdtransport in kWh/tonkm
d_{T1T2}	Afstand van terminal T_1 naar terminal T_2 in km
C_H	Vaste energetische kost van het hoofdtransport in kWh/ton

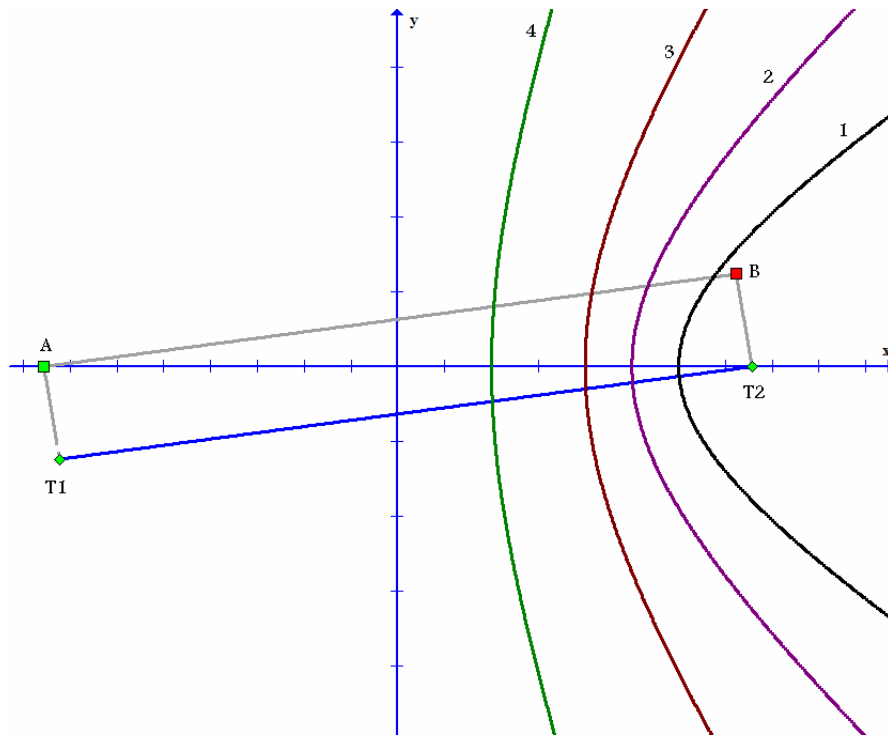
De **totale energetische kost van het multimodaal transport** bekomt men door de ecologische kost van het voor- en natransport en het hoofdtransport op te tellen. Zo bekomen we de volgende kostenfunctie:

$$T.EN.K.M = \underbrace{d_{AT1} \times C_{AT1} + C_V}_{\text{voortransport}} + \underbrace{d_{T1T2} \times C_{T1T2} + C_H}_{\text{hoofdtransport}} + \underbrace{d_{T2B} \times C_{T2B} + C_N}_{\text{natransport}}$$

Om de energetische haalbaarheidshyperbool en bijhorende asymptoten te berekenen, volstaat het de bovenstaande elementen in te vullen in de formules van het algemeen haalbaarheidmodel.

4.7 : Vergelijken van de economische, sociaal-economische, ecologische en energetische modellen

Hoewel de verschillende modellen gebruik maken van dezelfde basisvergelijkingen, zal hun onderling resultaat meer dan waarschijnlijk verschillend zijn. Wanneer wij het unimodaal wegvervoer vergelijken met het multimodaal binnenvaartalternatief, verwachten wij, op basis van de gegevens in hoofdstukken twee en drie, dat het binnenvaart alternatief op het ecologisch en het sociaal-economisch model beter zal 'scoren' dan het economisch model. Grafisch kunnen we dit controleren door de grote en positie van de haalbaarheidshyperbolen voor de verschillende modellen met elkaar te vergelijken. Des te groter de hyperbool van een model, des te beter het multimodaal traject hierop 'scoort'. Het beter 'scoren' van een alternatief op een bepaald model betekend simpelweg dat het haalbaarheidsgebied van dit model groter is dan andere. Het zegt niets over de specifieke haalbaarheid van een transportalternatief. In figuur 4.4 geven we een plausibel resultaat weer voor de afweging unimodaal wegvervoer en multimodaal binnenvaarttransport op basis van de vier hierboven besproken modellen.



Figuur 4.4: Voorstelling van de haalbaarheidshyperbolen van het economisch (1), het sociaal-economisch (2), het energetisch (3) en het ecologisch model (4). Het multimodaal binnenvaarttransport scoort relatief het beste op het energetisch model (4) en relatief het slechtste op het economisch model (1).

In het bovenstaande voorbeeld blijkt dat het multimodaal traject voor elk model voordeliger is dan het unimodaal wegtransport. Desalniettemin scoort het ecologisch model relatief het beste en het economisch model relatief het slechtste voor het multimodaal traject. Indien we kijken naar het unimodaal wegvervoer, dan kunnen we een omgekeerde conclusie maken: het economisch model scoort relatief het beste en het energetisch scoort relatief het slechtste.

4.8 : Sensitiviteitsanalyse van het algemeen haalbaarheidsmodel met $C_{T2B} = C_{AB}$

4.7.1 : Inleiding

In een sensitiviteitsanalyse wordt onderzocht in welke mate het resultaat van een economische evaluatie wordt beïnvloed door een verandering van methoden, waarde van parameters en variabelen. Op deze wijze trachten we de variabelen en parameters te identificeren, die de resultaten het meest beïnvloeden. Deze resultaten kunnen dan gebruikt worden om bepaalde beleidsbeslissingen te nemen. De sensitiviteitsanalyse welke we in dit onderdeel uitvoeren is toepasbaar op zowel het economisch, sociaal-economisch, ecologisch en energetisch haalbaarheidsmodel.

Men kan de sensitiviteitsanalyse bij de breakeven hyperbool op twee verschillende manieren uitvoeren. Men kan nagaan wat de invloed is van een verandering van een parameter op enerzijds de hyperboolvergelijking zelf en anderzijds op de asymptoten. Beide methode dienen uiteraard tot dezelfde conclusie te komen. Wij kiezen in deze verhandeling voor de eerste methode: de invloed nagaan op de hyperboolvergelijking.

Bij de afleiding van het breakeven hyperbool, bekwamen we volgende hyperbool vergelijking.

$$\rightarrow y = \pm \beta \sqrt{\left[\frac{x}{\alpha}\right]^2 - 1}$$

Om de sensitiviteitsanalyse goed te kunnen uitvoeren dienen we de parameters α en β terug te definiëren in hun oorspronkelijke vorm. We verkrijgen als dusdanig de volgende gelijkheid.

$$\rightarrow y = \pm \frac{\sqrt{4x_A^2 - K^2}}{2} \sqrt{\left[\frac{2x}{K}\right]^2 - 1} \quad (1)$$

$$\rightarrow K = \frac{C}{C_{AB}} = \frac{d_{AT1} \times C_{AT1} + C_V + d_{T1T2} \times C_{T1T2} + C_H + C_N - C_W}{C_{AB}} \quad (2)$$

Het snijpunt van de hyperbool met de x-as is de volgende:

$$\begin{aligned} \rightarrow y &= 0 \\ \rightarrow x &= \frac{C}{2C_{AB}} = \frac{K}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

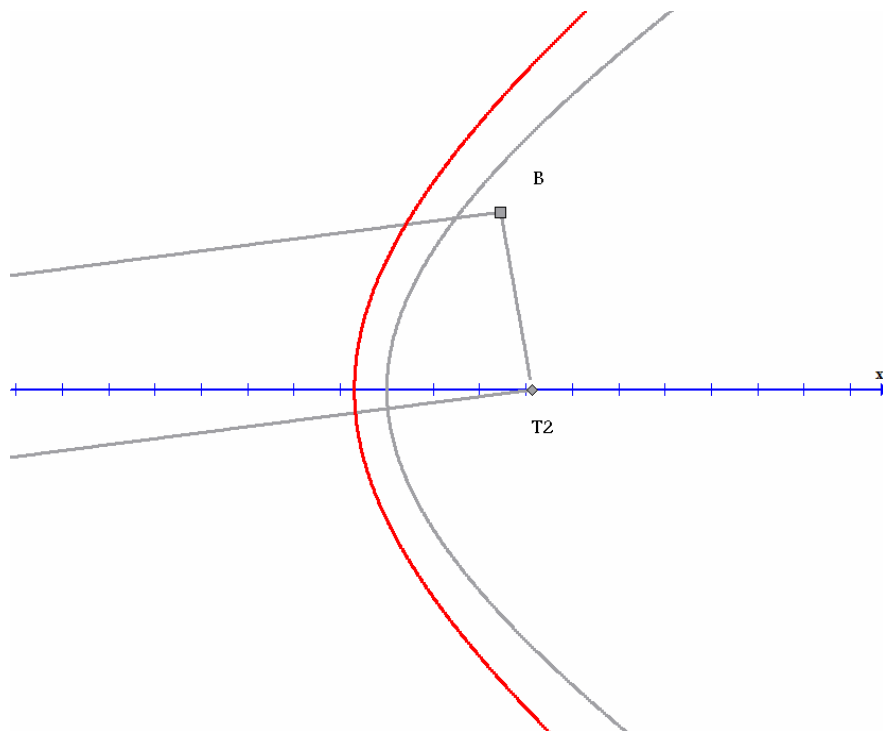
Symbol	Betekenis
C_{AT1}	Variabele kost voortransport in EUR/tonkm
C_{AB}	Variabele kost unimodaal transport in EUR/tonkm
C_{T1T2}	Variabele kost hoofdtransport in EUR/tonkm
C_{T2B}	Variabele kost natransport in EUR/tonkm
d_{AT1}	Afstand tussen onderneming A en terminal T_1 over de weg in km
d_{T1T2}	Afstand tussen terminal T_1 en T_2 over het kanaal of waterweg in km
d_{T2B}	Afstand tussen terminal T_2 en eindbestemming B over de weg in km
C_V	Vaste kost voortransport in EUR/ton
C_H	Vaste kost hoofdtransport in EUR/ton
C_N	Vaste kost natransport in EUR/ton

We zullen deze gelijkheid gebruiken bij het uitvoeren van de sensitiviteitsanalyse. We zoeken het effect van de volgende zeven wijzigingen.

1. een wijziging van de kostenverhouding unimodaal/hoofdtransport
2. een wijziging van de lengte van het voortransport
3. een verandering in de vaste kosten : o.a. overslagkosten
4. een wijziging van de gemiddelde snelheid van een specifieke modus
5. integreren van externe kosten
6. een verandering in de procentuele bezettingsgraad van een specifieke modus

4.7.2 : Geval 1 : Wijziging verhouding C_{AB} over C_{T1T2}

Hier gaan we uit van een wijziging van de verhouding van de variabele kost van het unimodaal wegvervoer = C_{AB} over de variabele kost van het hoofdtransport van het multimodaal vervoer = C_{T1T2} . We dienen hierbij ook te vermelden dat C_{AB} niet enkel de kost is van het unimodaal vervoer maar ook van het voor- en natransport van het multimodaal vervoer. De wijziging in de breakeven hyperbool kan als volgt voorgesteld worden.



Figuur 4.5 : Wijziging breakeven hyperbool uitgaande een stijging van de verhouding C_{AB}/C_{T1T2} , dit betekent dat de verhouding van de kost per tonkm van het unimodaal transport over de kost per tonkm van het multimodaal hoofdtraject toeneemt. Hierdoor wordt de hyperbool groter en zal het haalbaarheidsgebied voor het multimodaal traject toenemen. De grijze hyperbool is de oorspronkelijke en de rode de nieuwe.

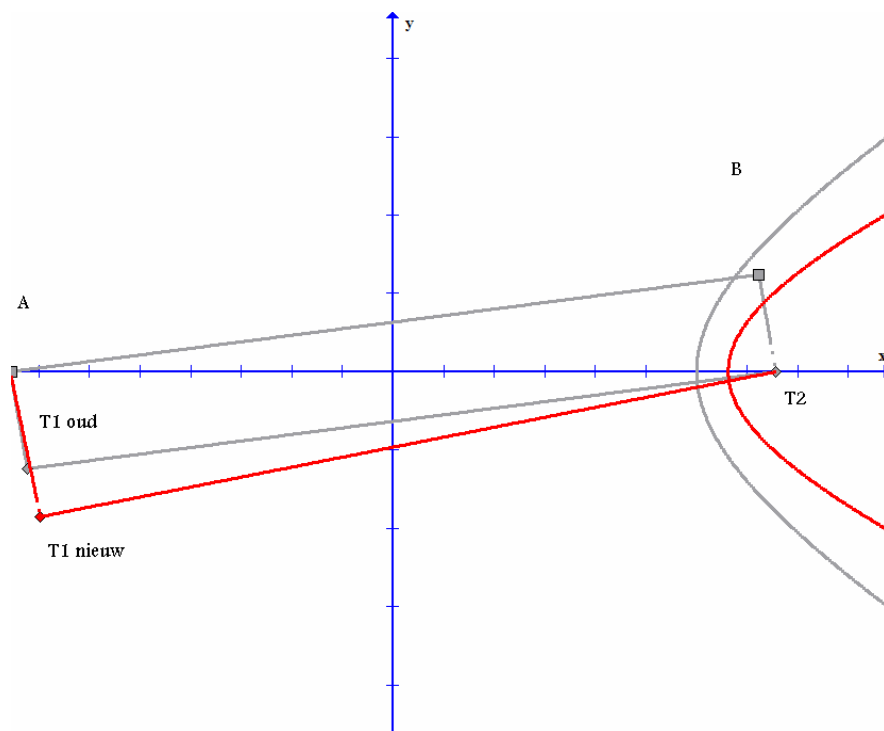
Indien we de verhouding vergroten gaan we van de grijze hyperbool naar de rode breakeven hyperbool. We kunnen dus concluderen dat bij een stijging in de verhouding C_{AB} op C_{T1T2} , de hyperbool breder wordt en aldus het rentabiliteitsgebied uitgebreid wordt. Analytisch kunnen we deze wijziging op de volgende manier verklaren : bij een verandering van de verhouding C_{AB} op C_{T1T2} , zal enkel de parameter K wijzigen. Uit (1) blijkt dat een daling van K leidt tot een bredere hyperbool. Uit (3) blijkt dat een daling van K leidt tot een verschuiving van de hyperbool naar links. Aangezien we veronderstellen dat $C_{AB} = C_{AT1} = C_{T2B}$, volgt uit (2) dat K gelijk is aan:

$$\rightarrow K = \frac{C}{C_{AB}} = \frac{C_V + d_{T1T2} \times C_{T1T2} + C_H + C_N - C_W}{C_{AB}} + d_{AT1}$$

Uit deze bovenstaande vergelijking kunnen we afleiden dat door een stijging in de verhouding C_{AB} op C_{T1T2} , de parameter K steeds kleiner wordt waardoor de breakeven hyperbool op zijn beurt breder wordt en naar links verschuift.

4.7.3 : Geval 2 : Een wijziging in de afstand van het voortransport (d_{AT1})

We beogen hier het effect op de hyperbool weer te geven van een ceteris paribus wijziging van de lengte van het voortransport. In de onderstaande figuur zijn we uitgegaan van een stijging van 50% ten opzichte van de oorspronkelijke lengte.



Figuur 4.6 : Wijziging van breakeven hyperbool uitgaande van een 50% stijging in de afstand van het voortransport (d_{AT1}). Aangezien het multimodaal traject toeneemt en het unimodaal niet, zal de nieuwe breakeven hyperbool (rood) kleiner worden. Het gevolg is dat het haalbaarheidsgebied kleiner wordt,

en de eindbestemming B er niet meer in ligt. Het unimodaal traject (d_{AB}) is nu voordeliger dan het multimodaal traject.

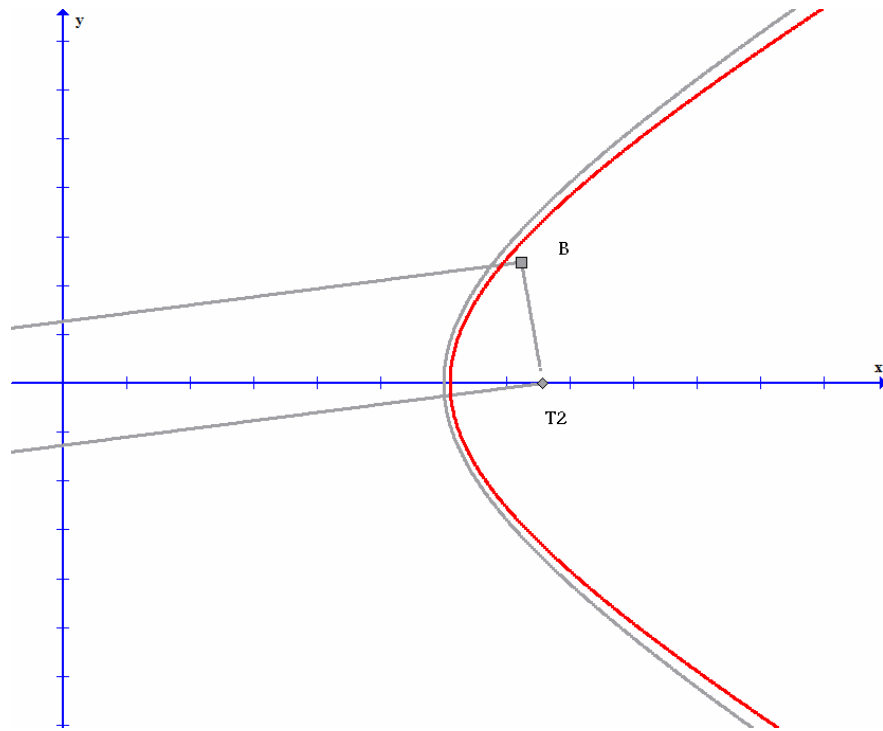
We kunnen duidelijk uit bovenstaande figuur afleiden dat een ceteris paribus stijging van de voortransport afstand, leidt tot een smallere hyperbool en een kleiner rentabiliteitsgebied. In het bovenstaand geval is de verkleining van de hyperbool zelfs zo groot dat het niet meer economisch rendabel is om goederen via de multimodale weg te transporteren van onderneming A naar eindbestemming B. Analytisch kunnen we dit effect als volgt verklaren: door de toename in d_{AT1} , zal enkel de parameter K wijzigen met $\Delta K = \Delta d_{AT1}$. Dit laatste volgt uit de vergelijking:

$$\rightarrow K = \frac{C}{C_{AB}} = \frac{C_V + d_{TIT2} \times C_{TIT2} + C_H + C_N - C_W}{C_{AB}} + d_{AT1}$$

Door de stijging van de parameter K zal de hyperbool zowel kleiner worden als verschuiven naar rechts. Dit laatste is een gevolg van (3).

4.7.4 : Geval 3 : Een verandering in vaste kosten

Een wijziging van de vaste kosten van enerzijds het unimodaal en anderzijds het multimodaal systeem, zal een impact hebben op de breakeven hyperbool. Aangezien de vaste kosten van het multimodaal systeem opgeteld worden bij de teller van parameter K en de vaste kosten van het unimodaal systeem afgetrokken worden van de teller van parameter K, spreken we hier over ofwel een netto toename van de parameter K, ΔK is positief, of een netto afname van de parameter K, ΔK is negatief. Een heel belangrijke vaste kost bij het multimodaal transport is de overslagkost. Het heeft een grote invloed op de haalbaarheid van het multimodaal traject. Vandaar dat het van kapitaal belang is dat we het effect kennen van een wijziging in deze overslagkost. In onderstaande figuur gaan we uit van een 10% toename van kost van overslag, welke leidt tot een netto toename van de vaste kosten.



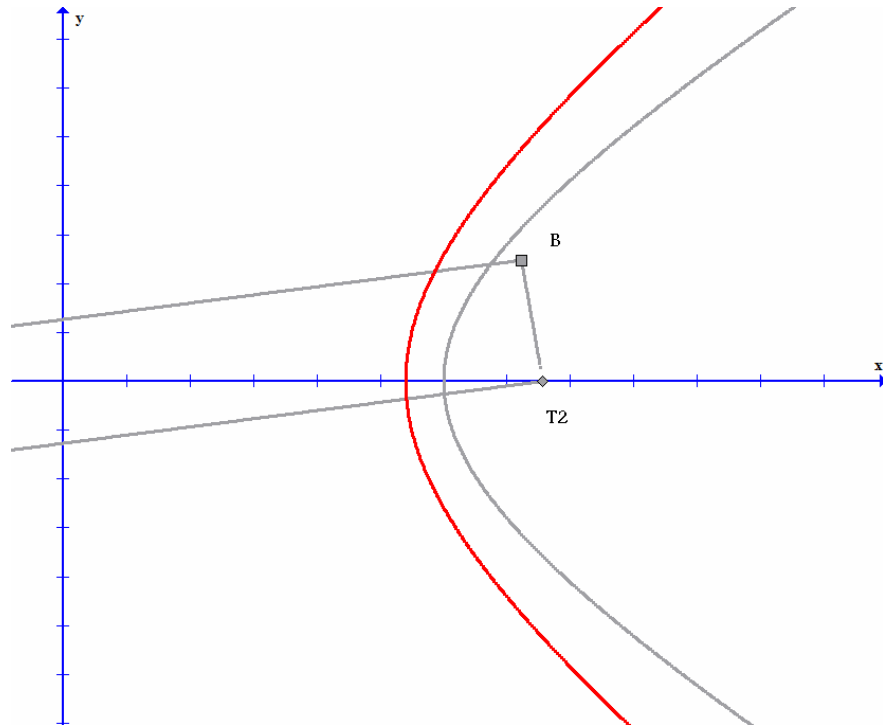
Figuur 4.7 : Wijziging van breakeven hyperbool ten gevolge van een 10% stijging van de overslagkosten van het multimodaal traject. Aangezien de vaste kosten van het multimodaal traject toenemen, zal de breakeven hyperbool en het daaruit volgend haalbaarheidsgebied verkleinen. De grijze hyperbool is de oorspronkelijke en de rode hyperbool de nieuwe.

Uit bovenstaande figuur blijkt dat een netto toename van de vaste kosten leidt tot een kleinere en naar rechts geschoven breakeven hyperbool. Dit kan analytisch op de volgende manier aangetoond worden: indien $\Delta(C_V + C_H + C_B - C_W) > 0$ dan volgt uit vergelijking (2) dat de parameter K zal toenemen waardoor, volgend uit vergelijking (1) en (3), de hyperbool kleiner wordt en naar rechts schuift. Uiteraard volgt hieruit dat een netto afname van de vaste kosten er zal voor zorgen dat de breakeven hyperbool groter wordt.

4.7.5 : Geval 4 : Een wijziging van de gemiddelde snelheid van een specifieke modus

Hoewel het verband tussen de gemiddelde snelheid van een vervoersmodus en de breakeven hyperbool niet voor de hand liggend is, zal deze laatste wel degelijk erdoor beïnvloed worden. Bij de uiteenzetting van de totale transportkost hebben we bepaald dat de kilometercoëfficiënt van zowel het unimodaal wegvervoer als multimodaal vervoersysteem bestaat uit drie elementen, met name de directe interne kosten, de externe kosten en de voorraadkost tijdens het transport. Het eerste en het laatste element zorgen voor de link tussen de gemiddelde snelheid en de grootte van de hyperbool. De eerste link wordt veroorzaakt doordat men de tijdvariabele kosten, onderdeel van de interne kosten, dient te herleiden naar kilometervariabele kosten. Dit doen we door de tijdskosten te delen door de gemiddelde snelheid. Dus des te lager de gemiddelde snelheid, des te hoger de interne kosten zullen zijn. De tweede link wordt veroorzaakt doordat men, bij de berekening van de in transit- en veiligheidsvoorraadkost, de gemiddelde snelheid van de gebruikte modus nodig heeft om de gemiddelde transportduur in jaren te berekenen. Een hogere gemiddelde snelheid geeft een lagere

voorraadkost tijdens transport en een lagere gemiddelde snelheid geeft een hogere voorraadkost. In onderstaande figuur wordt het effect weergegeven van een daling van de gemiddelde snelheid van het unimodaal vrachtvervoer. Hierbij gaan we uit dat de snelheid van het voor- en natransport dezelfde blijft.



Figuur 4.8 : Wijziging van de breakeven hyperbool uitgaande van een daling van de gemiddelde snelheid unimodaal transport ceteris paribus. Een daling van de gemiddelde snelheid zal zorgen voor een stijging in de in transit voorraad, de veiligheidsvoorraad en de interne transportkosten. De totale kosten van het unimodaal traject stijgen. Hierdoor zal de breakeven afstand van het multimodaal traject dalen. De breakeven hyperbool en het haalbaarheidsgebied worden groter. De grijze hyperbool is de oorspronkelijke en de rode hyperbool weerspiegelt de nieuwe situatie.

We kunnen duidelijk zien dat een verlaging van de gemiddelde snelheid van het unimodaal transport ceteris paribus leidt tot een vergroting van het rentabiliteitsgebied. Deze conclusie is dezelfde als de gemiddelde snelheid van het hoofdtransport toeneemt. Indien we spreken over een daling van de gemiddelde snelheid van het hoofdtransport of een stijging van de gemiddelde snelheid van het unimodaal transport, dan zal de breakeven hyperbool kleiner worden.

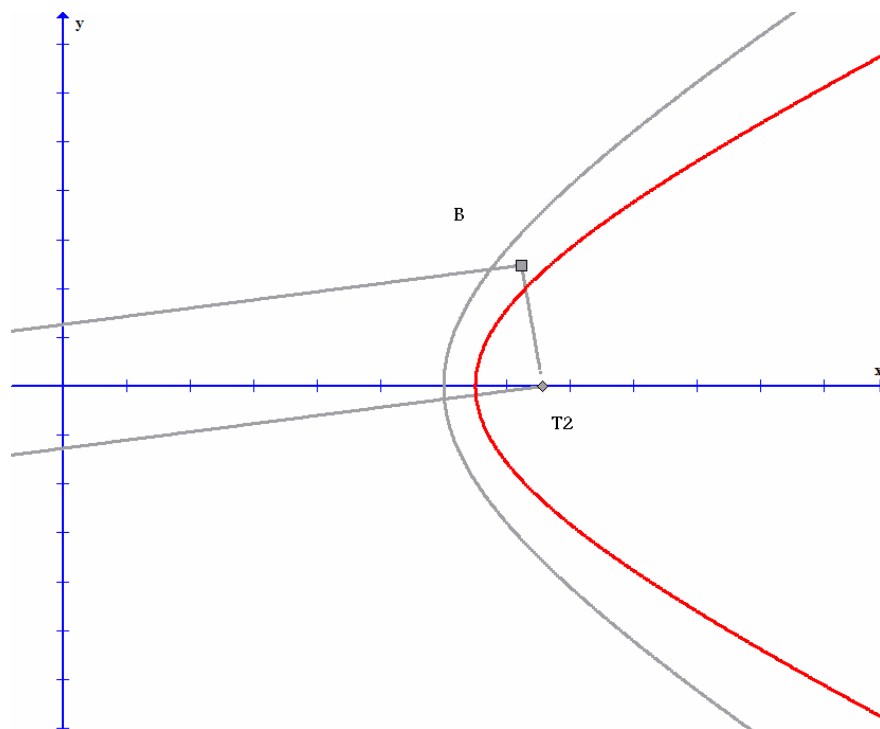
4.7.6 : Geval 5 : Integreren van externe kosten

Externe kosten zijn kosten van externe effecten, welke door de veroorzaker niet of onvolledig in zijn besluitvorming worden ingecalculleerd. Deze kosten bestaan uit zowel kilometer en tijdsafhankelijk als constant kosten. De kilometer en tijdsafhankelijk kosten zullen we integreren in de kilometercoëfficiënt. Het constante deel van de externe kosten voegen we toe tot de teller van de parameter K . Het effect van deze integratie op de breakeven hyperbool is voor de integratie van de kilometer en tijdsafhankelijk externe kosten dezelfde als een toename in de verhouding C_{AB} op C_{AT1} .

De integratie is gelijk aan een toename van de verhouding C_{AB} op C_{AT1} omdat de externe kosten van het unimodaal wegvervoer aanzienlijk hoger zijn dan die van het multimodaal transportsysteem. (Hoofdstuk drie) Het effect van de integratie van het constante deel van de externe kosten komt op zijn beurt overeen met de wijziging in vaste kosten, onderdeel 4.7.4.

4.7.7 : Geval 6 : Een verandering in de procentuele bezettingsgraad van een vervoersmodus

Bij de berekening van de variabele transportkosten zijn we steeds uitgegaan van een impliciete bezettingsgraad om aldus de variabele kosten te kunnen uitdrukken per tonkm. Indien, om welke reden dan ook, deze bezettinggraad wijzigt, zullen de variabele transportkosten niet dezelfde blijven. Bijvoorbeeld bij een daling van de bezettinggraad zal de variabele kost per tonkm stijgen, aangezien bepaalde kostenelementen, zoals het loon van de bestuurder van de vervoersmodus, nu zwaarder doorwegen. Uiteraard zal de stijging in variabele kosten minder dan rechtevenredig zijn met de daling van de bezettingsgraad. De wijziging in de variabele kosten ten gevolge van een verandering in bezettingsgraad, zal uiteraard de grootte en vorm van de breakeven hyperbool beïnvloeden. De volgende figuur geeft het effect weer van een daling in bezetting ceteris paribus van een binnenvaartschip.



Figuur 4.9 : Wijziging van de breakeven hyperbool veroorzaakt door een 20% daling van de bezettingsgraad van de gebruikte binnenvaartmodus. De interne transportkost per tonkm is afhankelijk van de bezettingsgraad van de gebruikte modus. Des te lager de bezetting, des te hoger de interne transportkost per tonkm en des te hoger de totale transportkost per tonkm. Het gevolg is dat de breakeven hyperbool en het haalbaarheidsgebied kleiner worden. De grijze hyperbool geeft de oorspronkelijke situatie weer, en de rode hyperbool de nieuwe. In de nieuwe situatie is het unimodaal traject voordeliger dan het multimodale.

Uit bovenstaande figuur is duidelijk af te leiden dat een daling in de bezettingsgraad van de binnenvaart leidt tot een kleinere breakeven hyperbool. Een daling in de bezettingsgraad van het unimodaal transport zou echter leiden tot een grotere hyperbool. Aangezien in figuur 4.9 de eindbestemming B niet binnen de rode hyperbool ligt, zal het unimodaal transport voordeliger zijn dan het multimodaal traject.

Hoofdstuk 5 : Haalbaarheidsmodellen uitgaande van niet gelijke variabele kosten van het unimodaal transport en het multimodaal natransport

5.1 : Inleiding

In het vorige hoofdstuk hebben we vier haalbaarheidsmodellen ontworpen. We zijn er bij hun afleiding steeds vanuit gegaan dat de variabele kost van het unimodaal transport identiek is aan die van het multimodaal natransport. Deze veronderstelling stelde ons in staat om het rentabiliteitsgebied van het multimodaal vervoer grafisch voor te stellen in de vorm van een breakeven hyperbool. Indien eindbestemming B aan de rechterzijde lag van de hyperbool, was het voordeliger om de goederen via het multimodale traject te transporteren.

In dit hoofdstuk gaan we opnieuw haalbaarheidsmodellen ontwerpen maar hierbij gaan we van een andere veronderstelling uit: de variabele kost van het unimodaal transport is niet gelijk aan die van het multimodaal voor- en natransport. Hoewel dit slechts een kleine aanpassing lijkt, zal het later bij de afleiding blijken dat de haalbaarheidsmodellen fundamenteel in vorm wijzigen. Net zoals in het vorige hoofdstuk zullen we in dit hoofdstuk vier haalbaarheidsmodellen ontwikkelen, met name het economisch, het ecologisch, het energetisch en het sociaal-economisch model. Het opzet van elk van deze modellen is om grafisch het gebied weer te geven waar een specifiek transporttraject voordeliger is, op basis van de geselecteerde vergelijkingscriteria, dan een ander mogelijk transportalternatief. In dit hoofdstuk gaan we op een analoge manier zoals in het vorige hoofdstuk te werk. Dit betekent dat we eerst een algemeen haalbaarheidsmodel zullen ontwikkelen welke op zijn beurt zal aangepast worden voor de vier verschillende haalbaarheidsmodellen.

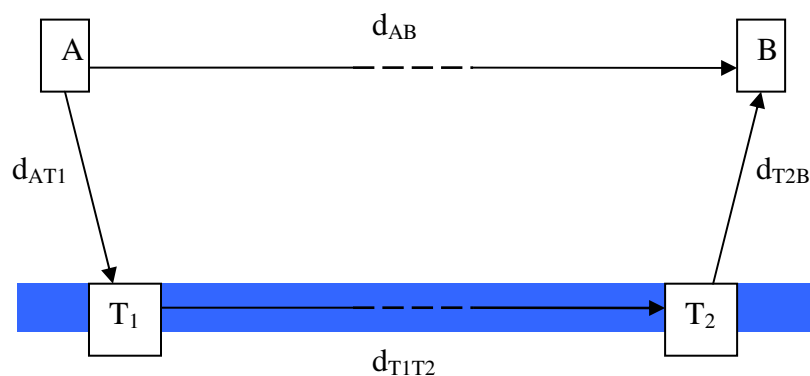
Vooraleer we van start gaan met de afleiding van het algemeen haalbaarheidsmodel, dienen we op te merken dat hoewel deze modellen realistischer zijn dan die van het vorige hoofdstuk, ze nog steeds een benadering zijn van de werkelijkheid. Desalniettemin kunnen deze modellen nuttig zijn om mogelijke transportdilemma's te identificeren en de besluitvormer de nodige inzichten te geven om een verantwoorde transportkeuze te maken.

5.2 : Afleiding algemeen haalbaarheidsmodel

Hoewel de modellen die we in het vorige en dit hoofdstuk afleiden geldig zijn voor elke vergelijking tussen twee verschillende transportalternatieven ongeacht het traject en de combinaties van modi die hiertoe gebruikt worden, gaan wij bij de ontwikkeling van onze modellen uit van het volgende: we vergelijken, net zoals in het vorige hoofdstuk, het unimodaal wegtransport met het multimodaal binnenvaart transport. Het multimodaal voor- en natransport wordt uitgevoerd door het wegvervoer. Deze concrete invulling zorgt voor de nodige verduidelijking tijdens de afleiding van de

haalbaarheidsmodellen. Het doet echter geen afbreuk aan de algemene toepasbaarheid van deze modellen.

Zoals in het vorige hoofdstuk gaan we er vanuit dat goederen dienen getransporteerd te worden tussen onderneming A en B, waarbij A de verzendende partij en B de ontvangende partij is. Wanneer men kiest voor het unimodaal wegvervoer zullen de goederen rechtstreeks over de weg getransporteerd worden van A naar B waarbij de afstand gelijk is aan d_{AB} . Het multimodaal vervoer bestaat enerzijds uit het voor- en natransport en anderzijds uit het hoofdtransport. Het voortransport heeft plaats tussen onderneming A en terminal T_1 met een totale afstand van d_{AT1} . In terminal T_1 worden de goederen overgeslagen naar één of meerdere binnenschepen. De binnenvaart voert het hoofdtransport uit tussen de terminal T_1 en de terminal T_2 met een afstand van d_{T1T2} . Het laatste traject in het multimodaal vervoer is het natransport, welke plaatsvindt tussen terminal T_2 en eindbestemming B met een afstand van d_{T2B} . De volgende figuur geeft bovenvermelde informatie schematisch weer.



Figuur 5.1 : Voorstelling van twee transportalternatieven, namelijk het unimodaal (d_{AB}) en het multimodaal transport (d_{AT1} , d_{T1T2} , d_{T2B}), A is de verzendende partij vanwaar de goederen vertrekken en B is de eindbestemming van het transport, T_1 en T_2 zijn de overslagterminals die gebruikt worden bij het multimodale traject.

Symbol	Verklaring
d_{AB}	Afstand van A naar B in km
d_{AT1}	Afstand van A naar Terminal 1 in km
d_{T1T2}	Afstand van Terminal 1 naar Terminal 2 in km
d_{T2B}	Afstand van Terminal 2 naar B in km

Bij de ontwikkeling van het model gaan we er vanuit dat onderneming A op een welbepaalde afstand ligt van de eerste overslagterminal. Met behulp van de in hoofdstuk twee en drie besproken kostenfuncties, berekenen we de transportkost van zowel het unimodaal als het multimodaal transport. Daarna zullen we aan de hand van de constructie van breakeven eivormige figuren bepalen in welke zone eindbestemming B best gelegen is opdat het multimodaal vervoer rendabel is ten opzichte van rechtstreeks wegvervoer.

Net zoals in het vorige hoofdstuk, dienen we eerst een vergelijking op te stellen van de transportkost van zowel het unimodaal als het multimodaal transport. We zullen hierbij alle variabele en alle vaste kostenelementen samen bundelen tot één variabel en één vast kostenelement. Aldus bekomen we voor het **unimodaal wegvervoer** de volgende uitdrukking.

$$T.K.U = C_{AB} \times d_{AB} + C_U$$

Symbool	Verklaring
T.K.U	Totale transportkost unimodaal wegvervoer in EUR/ton
C_{AB}	Variabele transportkost unimodaal wegvervoer in EUR/tonkm
d_{AB}	Afstand van onderneming A naar B over de weg in km
C_U	Vaste transportkost unimodaal wegvervoer in EUR/ton

Aangezien het multimodaal vervoer bestaat uit enerzijds het voor- en natransport en anderzijds het hoofdtransport, zullen we de totale transportkosten van het multimodaal vervoer als volgt weergeven:

$$T.K.M = T.K.V + T.K.H + T.K.N$$

$$T.K.V = C_{AT1} \times d_{AT1} + C_V$$

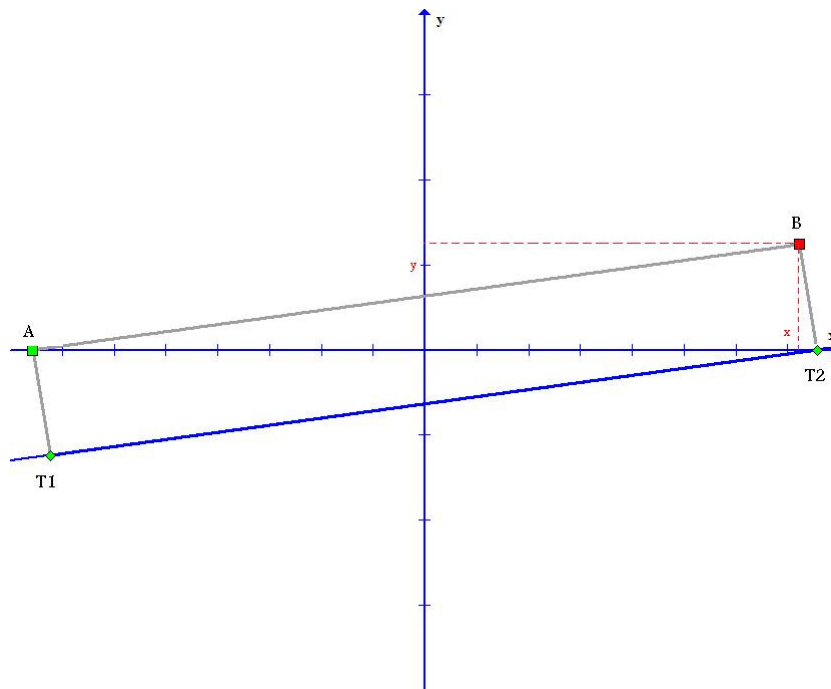
$$T.K.H = C_{T1T2} \times d_{T1T2} + C_H$$

$$T.K.N = C_{T2B} \times d_{T2B} + C_N$$

Symbolen	Verklaring
T.K.M	Totale transportkost multimodaal vervoer in EUR/ton
T.K.V	Totale kost van voortransport in EUR/ton
T.K.H	Totale kost van hoofdtransport in EUR/ton
T.K.N	Totale kost van natransport in EUR/ton
C_{AT1}	Variabele kost voortransport in EUR/tonkm
C_{T1T2}	Variabele kost hoofdtransport in EUR/tonkm
C_{T2B}	Variabele kost natransport in EUR/tonkm
d_{AT1}	Afstand van onderneming A naar Terminal 1 in km
d_{T1T2}	Afstand van Terminal 1 naar Terminal 2 in km
d_{T2B}	Afstand van Terminal 2 naar Eindbestemming B in km
C_V	Vaste kost voortransport in EUR/ton
C_H	Vaste kost hoofdtransport in EUR/ton
C_N	Vaste kost natransport in EUR/ton

Het doel van het model is het weergeven van de breakeven eivormige figuur. Deze bakent een gebied af waarbinnen eindbestemming B gevestigd dient te zijn zodat het multimodaal vervoer minstens even rendabel is dan het unimodaal wegvervoer. Om tot deze figuur te komen, dienen we eerst de totale transportkost van het rechtstreeks wegvervoer gelijk te stellen aan de totale kost van het multimodaal vrachtvervoer.

Analoog aan het vorige hoofdstuk, dienen we een plaatsoord in te voeren. Om tot eenvoudige formules te komen, kiezen we de x-as als de verbindinglijn tussen onderneming A en terminal T₂ en de y-as als middelloodlijn van lijnstuk d_{AT₂} waardoor het in twee gelijke helften wordt verdeeld. We bekomen de volgende voorstelling:



Figuur 5.2 : Voorstelling van beide vervoersalternatieven, met name het unimodaal wegvervoer en het multimodaal vervoer, de x-as is de verbindinglijn tussen onderneming A en terminal T₂ en de y-as is de middelloodlijn van het lijnstuk d_{AT₂} zodat de laatste in twee gelijke helften verdeeld wordt

Door de totale transportkosten van het unimodaal wegvervoer gelijk te stellen aan de totale transportkosten van het multimodaal vervoer, kunnen we de breakeven afstand berekenen.

$$T.K.U = T.K.M$$

$$T.K.U = T.K.V + T.K.H + T.K.N$$

$$d_{AB} \times C_{AB} + C_U = d_{AT1} \times C_{AT1} + C_V + d_{T1T2} \times C_{T1T2} + C_H + d_{T2B} \times C_{T2B} + C_N$$

Aangezien het de bedoeling is om het geografisch gebied weer te geven waarbinnen de eindbestemming B zich moet bevinden opdat het multimodaal vervoer rendabel is dan het direct

wegvervoer, zal de eindbestemming B de veranderlijke coördinaten x en y toegekend krijgen. Dit impliceert dat zowel de locatie van terminal T_1 als van terminal T_2 als vast aanzien worden, mede door het feit dat de geografische verspreiding van de bestaande terminals een snelle overschakeling niet toelaten. Aangezien eindbestemming B als enige veranderlijke coördinaten heeft, zullen de afstanden d_{AB} en d_{T_2B} de enige veranderlijke lengtes zijn in dit model. Het gevolg hiervan is dat de kosten van zowel het voor- als het hoofdtransport in het model als ook de vaste kosten van het unimodaal- en natransport als een constante term, aangeduid met het symbool C , beschouwd mogen worden. Indien we bovenstaande bevindingen in ons analytisch model introduceren bekommen we :

$$d_{AB} \times C_{AB} = d_{T_2B} \times C_{T_2B} + C$$

$$C = \text{constante} = d_{AT_1} \times C_{AT_1} + C_V + d_{T_1T_2} \times C_{T_1T_2} + C_H + C_N - C_U$$

Indien we de variabele kostenelementen naar het linkerlid overbrengen en de vergelijking deelt door C_{AB} , bekommen we de volgende uitdrukking.

$$d_{AB} - d_{T_2B} \times \frac{C_{T_2B}}{C_{AB}} = K$$
$$K = \frac{C}{C_{AB}} = \text{constante}$$

Zoals we reeds in het begin van dit hoofdstuk vermeld hebben, gaan we bij de afleiding van de haalbaarheidsmodellen er vanuit dat $C_{T_2B} \neq C_{AB}$. Deze stelling kan op de volgende manier geïnterpreteerd worden: de totale variabele transportkost voor het unimodaal vervoer is niet gelijk aan de totale variabele transportkost van het natransport.

We dienen eerst de afstanden d_{AB} en d_{T_2B} te herleiden naar x en y coördinaten. Dit doen we door middel van de stelling van Pythagoras toe te passen op figuur 5.1. We bekommen de volgende vergelijkingen.

$$d_{AB}^2 = [x + |x_A|]^2 + [y - y_A]^2$$
$$d_{T_2B}^2 = [x - x_{T_2}]^2 + [y - y_{T_2}]^2$$

Aangezien de y -as fungeert als een middelloodlijn van het lijnstuk $[A, T_2]$, kunnen we concluderen dat $x_{T_2} = |x_A|$. Daarenboven kunnen we van de figuur afleiden dat y_A en y_{T_2} gelijk moeten zijn aan nul, omdat beide punten op de x -as gelegen zijn. We bekommen de volgende vergelijkingen.

$$C_{AB} \times d_{AB} = C + d_{T_2B} \times C_{T_2B}$$

$$C_{AB} \times \sqrt{(x + |x_A|)^2 + y^2} = C + C_{T2B} \times \sqrt{(x - |x_A|)^2 + y^2}$$

Verder vereenvoudigen we de voorstelling van de vergelijking door de volgende substituties door te voeren.

$$\begin{aligned} (x + |x_A|)^2 &= W & W + Y &= M \\ (x - |x_A|)^2 &= V & V + Y &= N \quad (2) \\ y^2 &= Y \end{aligned}$$

We verkrijgen volgende vergelijking:

$$C_{AB} \times \sqrt{M} = C + C_{T2B} \times \sqrt{N}$$

We kwadrateren beide leden:

$$C_{AB}^2 \times M = C^2 + C_{T2B}^2 \times N + 2CC_{T2B} \sqrt{N}$$

Opnieuw kwadrateren we beide leden en werken verder uit.

$$\begin{aligned} [C_{AB}^2 \times M - C^2 - C_{T2B}^2 \times N]^2 &= [2CC_{T2B} \sqrt{N}]^2 \\ [C_{AB}^2 \times M - C_{T2B}^2 \times N]^2 - 2C^2 [C_{AB}^2 \times M + C_{T2B}^2 \times N] + C^4 &= 0 \end{aligned}$$

Deze laatste vergelijking geldt enkel wanneer $C_{AB}^2 \times M - C^2 - C_{T2B}^2 \times N > 0$. We vervangen M en N door hun uitdrukking in (2) en werken verder uit. Aldus bekomen we de volgende vergelijkingen:

$$\begin{aligned} [C_{AB}^2 \times (W + Y) - C_{T2B}^2 \times (V + Y)]^2 - 2C^2 [C_{AB}^2 \times (W + V) + C_{T2B}^2 \times (V + Y)] + C^4 &= 0 \\ \rightarrow (C_{AB}^2 - C_{T2B}^2)^2 \times Y^2 + 2(C_{AB}^2 \times W - C_{T2B}^2 \times V) \times Y - 2C^2 (C_{AB}^2 + C_{T2B}^2) Y \\ + (C_{AB}^2 \times W - C_{T2B}^2 \times V)^2 - 2C^2 (C_{AB}^2 \times W + C_{T2B}^2 \times V) + C^4 &= 0 \end{aligned}$$

$$\rightarrow (C_{AB}^2 - C_{T2B}^2)^2 \times Y^2 + 2[(C_{AB}^2 \times W - C_{T2B}^2 \times V) - C^2(C_{AB}^2 + C_{T2B}^2)]Y + (C_{AB}^2 \times W - C_{T2B}^2 \times V)^2 - 2C^2(C_{AB}^2 \times W + C_{T2B}^2 \times V) + C^4 = 0 \quad (3)$$

Met deze formule kan men voor elke x berekenen:

1. $W = (x + |x_A|)^2$ en $V = (x - |x_A|)^2$
2. Kwadratische vergelijking in Y
3. Deze oplossen naar y
4. Dan is $y = \pm\sqrt{Y}$ en vindt men de meetkundige plaats voor P(x;y)

Aangezien deze laatste functie een tweede graadsfunctie is van Y, kunnen we op eenvoudige wijze de discriminant berekenen en zo een direct verband vinden tussen x en y. De bovenstaande functie kan als volgt voorgesteld worden.

$$AY^2 - 2BY + C = 0 \quad \rightarrow Y = \frac{B \pm \sqrt{B^2 - A \times C}}{A}$$

met de discriminant $= \sqrt{B^2 - A \times C}$

$$A = (C_{T2B}^2 - C_{AB}^2)^2$$

$$B = (C_{T2B}^2 - C_{AB}^2) \times (C_{AB}^2 \times W - C_{T2B}^2 \times V) + C^2(C_{T2B}^2 + C_{AB}^2)$$

$$C = C^4 - 2C^2(C_{AB}^2 \times W + C_{T2B}^2 \times V) + (C_{AB}^2 \times W - C_{T2B}^2 \times V)^2$$

Op basis van vergelijking (3) berekenen we de discriminant van Y.

$$\begin{aligned} \text{Discriminant} = & \left[(C_{AB}^2 - C_{T2B}^2) \times (C_{AB}^2 \times W - C_{T2B}^2 \times V) - C^2(C_{AB}^2 + C_{T2B}^2) \right]^2 \\ & - (C_{AB}^2 - C_{T2B}^2)^2 \times ((C_{AB}^2 \times W - C_{T2B}^2 \times V)^2 - 2C^2(C_{AB}^2 \times W \\ & + C_{T2B}^2 \times V) + C^4) \end{aligned}$$

Na het uitwerken van de haakjes en het substitueren van W en V door hun uitdrukking vermeld in (2), bekomen we na vereenvoudiging de volgende uitdrukking.

$$\text{Discriminant} = 4C_{AB}^2 \times C_{T2B}^2 \times C^2 \left[C^2 - 4(C_{AB}^2 - C_{T2B}^2)x \times |x_A| \right]$$

Aangezien $C_{T2B} > C_{AB}$ kunnen we de discriminant ook uitdrukken als volgt.

$$\sqrt{\text{Discriminant}} = 2C_{AB} \times C_{T2B} \times C \times \sqrt{C^2 + 4(C_{T2B}^2 - C_{AB}^2)x \times |x_A|}$$

Omdat $Y = y^2 = \frac{B \pm \sqrt{\text{discriminant}}}{A}$ en de discriminant reeds berekend hebben, dienen we nog B over A te berekenen:

$$\begin{aligned} \rightarrow B &= (C_{T2B}^2 - C_{AB}^2)(C_{AB}^2 \times W - C_{T2B}^2 \times V) + C^2(C_{T2B}^2 + C_{AB}^2) \\ \rightarrow B &= (C_{T2B}^2 - C_{AB}^2) \left[- (C_{T2B}^2 - C_{AB}^2)(x^2 + x_A^2) + (C_{T2B}^2 + C_{AB}^2) \times 2x|x_A| \right] \\ &\quad + C^2(C_{T2B}^2 + C_{AB}^2) \\ \rightarrow \frac{B}{A} &= \frac{(C_{T2B}^2 - C_{AB}^2)}{(C_{T2B}^2 - C_{AB}^2)^2} \left[- (C_{T2B}^2 - C_{AB}^2)(x^2 + x_A^2) + (C_{T2B}^2 + C_{AB}^2) \times 2x|x_A| \right] \\ &\quad + \frac{C^2(C_{T2B}^2 + C_{AB}^2)}{(C_{T2B}^2 - C_{AB}^2)^2} \\ \rightarrow \frac{B}{A} &= -(x^2 + x_A^2) + \frac{(C_{T2B}^2 - C_{AB}^2)}{(C_{T2B}^2 - C_{AB}^2)} \times 2x|x_A| + \frac{C^2(C_{T2B}^2 + C_{AB}^2)}{(C_{T2B}^2 - C_{AB}^2)^2} \end{aligned}$$

Dus we kunnen concluderen dat :

$$\begin{aligned} Y = y^2 &= C^2 \times \frac{[C_{T2B}^2 + C_{AB}^2]}{[C_{T2B}^2 - C_{AB}^2]^2} + \frac{C_{T2B}^2 + C_{AB}^2}{C_{T2B}^2 - C_{AB}^2} \times 2x|x_A| - [x^2 + x_A^2] \\ &\quad \pm \frac{2C_{AB}C_{T2B}C}{[C_{T2B}^2 - C_{AB}^2]^2} \times \sqrt{C^2 + 4[C_{T2B}^2 - C_{AB}^2] \times x|x_A|} \end{aligned} \quad (4)$$

We dienen te bepalen welk teken van toepassing is op bovenstaande formule. Dit kunnen we nagaan doordat $C_{AB}^2 \times M - C^2 - C_{T2B}^2 \times N > 0$. We bekommen aldus volgende berekeningen:

$$\rightarrow C_{AB}^2 [(x + |x_A|)^2 + y^2] - C_{T2B}^2 [(x - |x_A|)^2 + y^2] - C^2 > 0$$

$$\rightarrow \text{Als } C_{T2B} > C_{AB}$$

$$\rightarrow 2x|x_A| \times \frac{C_{T2B}^2 + C_{AB}^2}{(C_{T2B}^2 - C_{AB}^2)} - (x^2 + x_A^2) - \frac{C^2}{C_{T2B}^2 - C_{AB}^2} > y^2$$

$$\rightarrow \text{Daar } \frac{C^2(C_{T2B}^2 + C_{AB}^2)}{(C_{T2B}^2 - C_{AB}^2)^2} > \frac{C^2}{(C_{T2B}^2 - C_{AB}^2)}$$

$$\rightarrow \text{moet ook } \frac{C^2(C_{T2B}^2 + C_{AB}^2)}{(C_{T2B}^2 - C_{AB}^2)^2} + 2x|x_A| \times \frac{C_{T2B}^2 + C_{AB}^2}{C_{T2B}^2 - C_{AB}^2} - (x^2 - x_A^2) > y^2$$

We kunnen dus concluderen dat het teken bij vergelijking (4) negatief moet zijn. Indien we een uitdrukking willen bekomen van y in functie van x, dienen we de vierkantswortel te nemen van beide leden van vergelijking (4).

Indien we het functieverloop tekenen van vergelijking (4), zie volgende figuur, merken we op dat de meetkundige plaats een gesloten kromme is. Dit kunnen we op de volgende manier analytisch bewijzen voor alle gevallen waarbij $2C_{AB}|x_A|$ groter is dan K en $C_{T2B} > C_{AB}$.

De kleinste waarde van x waar het multimodaal transport haalbaar is komt overeen met:

$$\rightarrow x < |x_A| : C_{AB} \times (x + |x_A|) = C - C_{T2B} \times (x - |x_A|)$$

$$(C_{T2B} + C_{AB}) \times x = C + (C_{T2B} - C_{AB}) \times |x_A|$$

$$\Rightarrow x_1 = \frac{C}{C_{T2B} + C_{AB}} + \frac{C_{T2B} - C_{AB}}{C_{T2B} + C_{AB}} \times |x_A|$$

$$\Rightarrow y_1 = 0$$

Is het gebied een gesloten kromme? Of met andere woorden is er een tweede x-waarde waarvoor y=0?

$$\rightarrow x > x_A : C_{AB} \times (x + |x_A|) = C + C_{T2B} \times (x - |x_A|)$$

$$(C_{T2B} - C_{AB}) \times x = (C_{T2B} + C_{AB}) \times |x_A| - C$$

$$\Rightarrow x_2 = \frac{C_{T2B} + C_{AB}}{C_{T2B} - C_{AB}} \times |x_A| - \frac{C}{C_{T2B} - C_{AB}}$$

$$\Rightarrow y_2 = 0$$

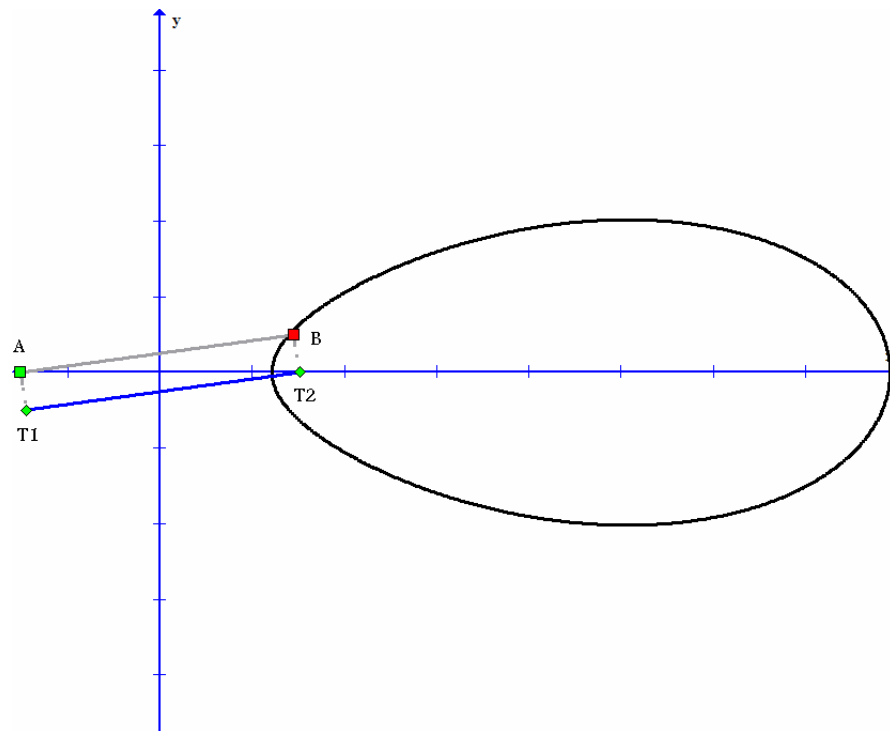
We kunnen dus concluderen dat het haalbaarheidsgebied een gesloten eindig gebied is , met andere woorden ellipsvormig , met snijpunten met de x-as in X_1 en X_2 :

$x_1 = \frac{C + (C_{T2B} - C_{AB}) \times x_A }{C_{T2B} + C_{AB}}$	$x_2 = \frac{(C_{T2B} + C_{AB}) \times x_A - C}{C_{T2B} - C_{AB}}$
--	--

De algemene vergelijking van de eivormige figuur wordt hieronder gegeven.

$$Y = y^2 = C^2 \times \frac{[C_{T2B}^2 + C_{AB}^2]}{[C_{T2B}^2 - C_{AB}^2]^2} + \frac{C_{T2B}^2 + C_{AB}^2}{C_{T2B}^2 - C_{AB}^2} \times 2x|x_A| - [x^2 + x_A^2] - \frac{2C_{AB}C_{T2B}C}{[C_{T2B}^2 - C_{AB}^2]^2} \times \sqrt{C^2 + 4[C_{T2B}^2 - C_{AB}^2]} \times x|x_A| \quad (5)$$

Indien we grafisch deze ellips weergeven bekomen we de volgende figuur:



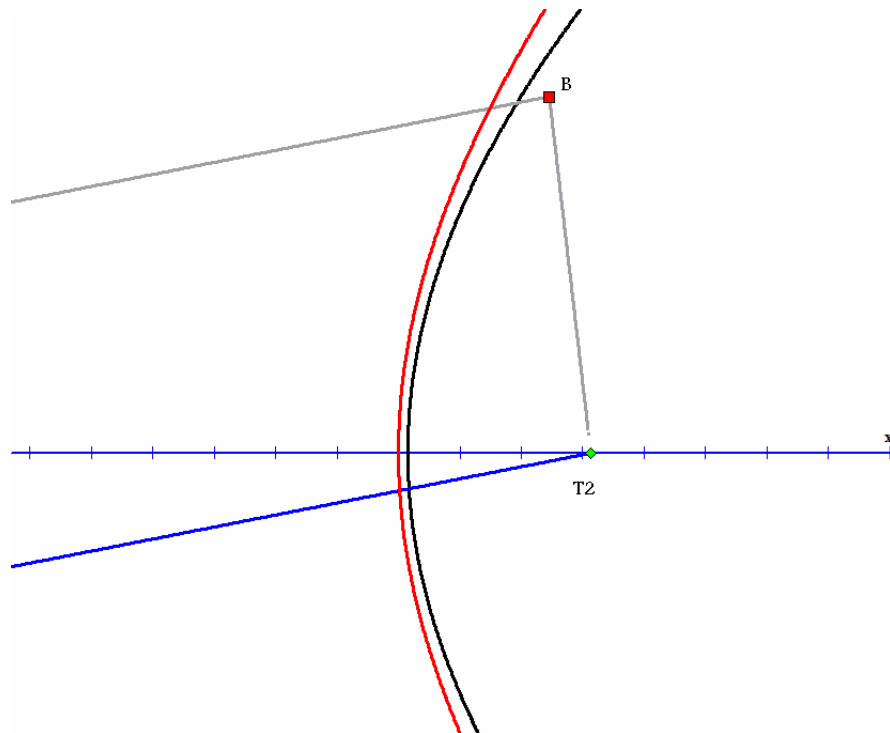
Figuur 5.3 : Voorstelling van de breakeven eivormige figuur, $\beta = 1.1$, A is de verzendende onderneming en B is de eindbestemming. T1 en T2 zijn de overslagterminals van het multimodaal traject. Indien de eindbestemming in het eivormig gebied ligt, dan is het voordeliger om de goederen te transporteren via het multimodaal traject dan het unimodaal transport. Aangezien B in het bovenstaand geval in het eivormig gebied ligt, zal het multimodaal traject het voordeligste zijn.

Met behulp van de parameters en de vergelijkingen van de eivormige figuur, kan men voor iedere situatie de breakeven figuur construeren. Gemakkelijkheidshalve zullen we voor de rest van de analyse de verhouding C_{T2B} over C_{AB} gelijk stellen aan parameter β . Wanneer eindbestemming B zich in het eivormige gebied bevindt, kunnen we concluderen dat, uitgaande van de stelling $C_{T2B} \neq C_{AB}$, het rendabeler is om goederen te transporteren op de multimodale wijze dan volledig over de weg. Indien de eindbestemming B buiten de eivormige figuur ligt, dan zal het voordeliger zijn om de goederen via het unimodaal traject te transporteren. Zoals we in de bovenstaande figuur zien, is het haalbaarheidsgebied eindig. Dit komt doordat op een gegeven punt het duurder natransport het

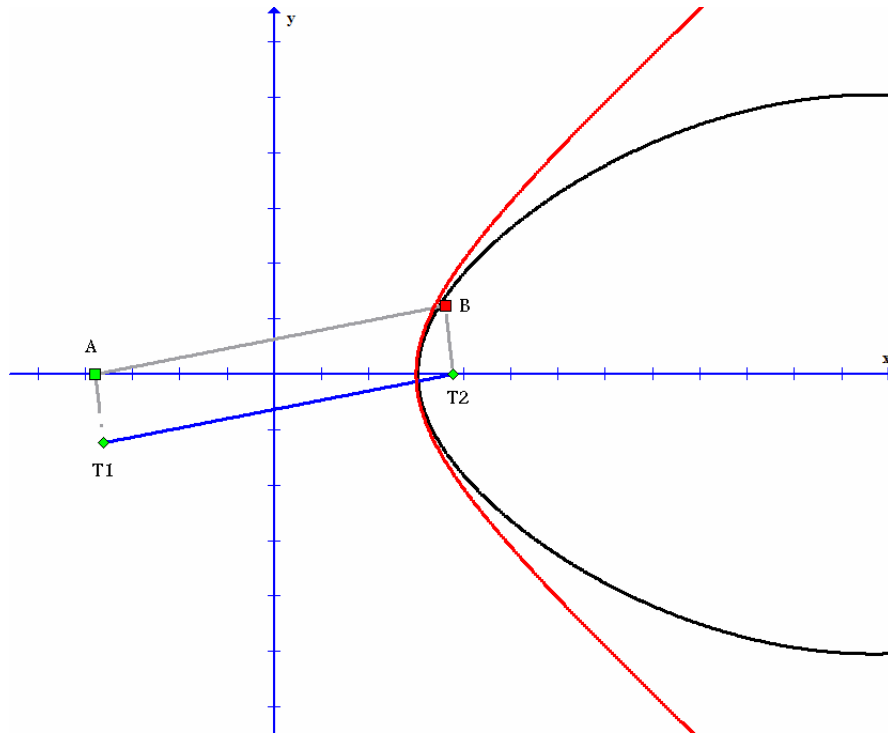
gecreëerde voordeel te niet doet. Indien men het haalbaarheidsgebied wil uitbreiden, dan kan men kiezen voor bijkomende terminals en/of een betere infrastructuur(aansluiting) in terminal T_2 . De bijkomende terminals zouden geplaatst moeten worden aan de rechterbuitenzijde van de eivormige figuur. Door de plaatsing van deze extra terminals, zal het rendabel bereik van het multimodaal traject vanuit onderneming A aanzienlijk uitgebreid worden.

5.3 : Vergelijking $C_{T_2B} \neq C_{AB}$ met $C_{T_2B} = C_{AB}$

Indien we het algemeen haalbaarheidsmodel van het vorige hoofdstuk vergelijken met het zojuist afgeleide model, bekomen we de volgende figuur.



Figuur 5.4 : Voorstelling van zowel breakeven hyperbool (Rood) als breakeven eivormige figuur (Zwart) van het algemeen haalbaarheidsmodel met een β van 1.1, detailweergave. We kunnen duidelijk zien dat de hyperbool groter en meer naar links gelegen is. Met andere woorden: het haalbaarheidsgebied zal steeds groter zijn bij de breakeven hyperbool dan bij de breakeven eivormige figuur.



Figuur 5.5 : Voorstelling van zowel breakeven hyperbool (Rood) als breakeven eivormige figuur (Zwart) van het algemeen haalbaarheidsmodel met een β van 1.1. We kunnen duidelijk zien dat de hyperbool groter en meer naar links gelegen is. Met andere woorden: het haalbaarheidsgebied zal steeds groter zijn bij de breakeven hyperbool dan bij de breakeven eivormige figuur.

Met rode functie : stelling $C_{T2B} = C_{AB}$: breakeven hyperbool.

Met zwarte functie : stelling $C_{T2B} \neq C_{AB}$: breakeven ellips.

Nu we het algemeen haalbaarheidsmodel hebben afgeleid, gaan we het toepassen op de vier verschillende modellen, met name het economisch, het ecologisch, het energetisch en het sociaal-economisch model. Aangezien de afleiding van de eivormige figuur voor alle vier modellen overeenstemmen met het algemeen model, beperken wij ons tot het bespreken van de samenstelling van de algemene kostenparameters voor de verschillende modellen. We beginnen bij het economisch model.

5.4 : Economisch haalbaarheidsmodel met $C_{T2B} \neq C_{AB}$

In deze paragraaf bekijken en vereenvoudigen we de kosten van het economisch haalbaarheidsmodel. Aangezien deze stap identiek is aan het in hoofdstuk vier besproken economisch haalbaarheidsmodel, zullen we hieronder de reeds vereenvoudigde kostenfuncties weergeven. We verwijzen naar het deel '4.3: Economisch haalbaarheidsmodel' in hoofdstuk vier voor meer informatie omtrent de vereenvoudiging van de kostenfunctie.

Voor **het unimodaal wegvervoer** bekwamen we de volgende uitdrukking:

$$T.E.K.U = C_{AB} \times d_{AB} + C_U$$

Symbol	Verklaring
T.E.K.U	Totale economische transportkost unimodaal wegvervoer in EUR/ton
C_{AB}	Variabele transportkost unimodaal wegvervoer in EUR/tonkm
d_{AB}	Afstand van onderneming A naar B over de weg in km
C_U	Vaste transportkost unimodaal wegvervoer in EUR/ton

Voor het **multimodaal vervoer** kunnen we de kostenfunctie weergeven als volgt:

$$T.E.K.V = C_{AT1} \times d_{AT1} + C_V$$

$$T.E.K.H = C_{T1T2} \times d_{T1T2} + C_H$$

$$T.E.K.N = C_{T2B} \times d_{T2B} + C_N$$

$$T.E.K.M = T.E.K.V + T.E.K.H + T.E.K.N$$

Symbolen	Verklaring
T.E.K.M	Totale economische transportkost multimodaal vervoer in EUR/ton
T.E.K.V	Totale economische kost van voortransport in EUR/ton
T.E.K.H	Totale economische kost van hoofdtransport in EUR/ton
T.E.K.N	Totale economische kost van natransport in EUR/ton
C_{AT1}	Variabele kost voortransport in EUR/tonkm
C_{T1T2}	Variabele kost hoofdtransport in EUR/tonkm
C_{T2B}	Variabele kost natransport in EUR/tonkm
d_{AT1}	Afstand van onderneming A naar Terminal 1 in km
d_{T1T2}	Afstand van Terminal T_1 naar Terminal T_2 in km
d_{T2B}	Afstand van Terminal T_2 naar Eindbestemming B in km
C_V	Vaste kost voortransport in EUR/ton
C_H	Vaste kost hoofdtransport in EUR/ton
C_N	Vaste kost natransport in EUR/ton

Om de economisch breakeven eivormige figuur te berekenen, volstaat het de bovenstaande elementen in te vullen in de formule (5) van het algemeen haalbaarheidmodel.

5.5 : Sociaal-economisch haalbaarheidsmodel met $C_{T2B} \neq C_{AB}$

We dienen de kostenparameters van het algemeen model te specificeren in termen van het sociaal-economisch model. Aangezien deze stap identiek is aan het in hoofdstuk vier besproken sociaal-economisch haalbaarheidsmodel, zullen we hieronder de reeds vereenvoudigde kostenfuncties weergeven. We verwijzen naar het deel '4.4: Sociaal-economisch haalbaarheidsmodel' in hoofdstuk vier voor meer informatie omtrent de vereenvoudiging van de kostenfunctie.

Voor **het unimodaal wegvervoer** bekwamen we de volgende uitdrukking:

$$T.S.K.U = C_{AB} \times d_{AB} + C_U$$

Symbol	Verklaring
T.S.K.U	Totale sociale economische transportkost unimodaal wegvervoer in EUR/ton
C_{AB}	Variabele transportkost unimodaal wegvervoer in EUR/tonkm
d_{AB}	Afstand van onderneming A naar B over de weg in km
C_U	Vaste transportkost unimodaal wegvervoer in EUR/ton

Voor het **multimodaal vervoer** kunnen we de kostenfunctie weergeven als volgt:

$$T.S.K.M = \underbrace{d_{AT1} \times C_{AT1} + C_V}_{T.E.K.V} + \underbrace{d_{T1T2} \times C_{T1T2} + C_H}_{T.E.K.H} + \underbrace{d_{T2B} \times C_{T2B} + C_N}_{T.E.K.N}$$

Symbolen	Verklaring
T.S.K.M	Totale sociale economische transportkost multimodaal vervoer in EUR/ton
T.S.K.V	Totale sociale kost van voorttransport in EUR/ton
T.S.K.H	Totale sociale kost van hoofdtransport in EUR/ton
T.S.K.N	Totale sociale kost van natransport in EUR/ton
C_{AT1}	Variabele kost voorttransport in EUR/tonkm
C_{T1T2}	Variabele kost hoofdtransport in EUR/tonkm
C_{T2B}	Variabele kost natransport in EUR/tonkm
d_{AT1}	Afstand van onderneming A naar Terminal 1 in km
d_{T1T2}	Afstand van Terminal T_1 naar Terminal T_2 in km
d_{T2B}	Afstand van Terminal T_2 naar Eindbestemming B in km
C_V	Vaste kost voorttransport in EUR/ton
C_H	Vaste kost hoofdtransport in EUR/ton
C_N	Vaste kost natransport in EUR/ton

Om de formule van de sociaal-economisch eivormige figuur te bekomen, volstaat het de bovenstaande elementen in te vullen in de formules van het algemeen haalbaarheidmodel.

5.6 : Ecologisch haalbaarheidsmodel met $C_{T2B} \neq C_{AB}$

We dienen eerst weer de kostenparameters van het algemeen haalbaarheidsmodel te specificeren in termen van het ecologisch model voor zowel het unimodaal als het multimodaal transport. Net zoals bij de vorige modellen is deze stap identiek aan het in hoofdstuk vier besproken ecologisch haalbaarheidsmodel. We zullen dus hieronder de reeds vereenvoudigde kostenfuncties weergeven. We verwijzen naar het deel '4.5: Ecologisch haalbaarheidsmodel' in hoofdstuk vier voor meer informatie omtrent de vereenvoudiging van de kostenfunctie.

Voor **het unimodaal wegvervoer** bekwamen we de volgende uitdrukking:

$$T.EC.K.U = C_{AB} \times d_{AB} + C_U$$

Symbool	Verklaring
T.EC.K.U	Totale ecologische kost unimodaal wegvervoer in EUR/ton
T.EC.K.M	Totale ecologische kost multimodaal vervoer in EUR/ton
C_{AB}	Variabele ecologische kost unimodaal wegvervoer in EUR/tonkm
d_{AB}	Afstand van onderneming A naar B over de weg in km
C_U	Vaste ecologische kost unimodaal wegvervoer in EUR/ton

Voor het **multimodaal vervoer** kunnen we de kostenfunctie weergeven als volgt:

$$T.EC.K.M = \underbrace{d_{AT1} \times C_{AT1} + C_V}_{voortransport} + \underbrace{d_{T1T2} \times C_{T1T2} + C_H}_{hoofdtransport} + \underbrace{d_{T2B} \times C_{T2B} + C_N}_{natransport}$$

Om de formule van de ecologisch eivormige figuur te bekomen, volstaat het de bovenstaande elementen in te vullen in de formules van het algemeen haalbaarheidmodel.

5.7 : Energetisch haalbaarheidsmodel met $C_{T2B} \neq C_{AB}$

We dienen eerst de kostenparameters van het algemeen haalbaarheidsmodel te specificeren in termen van het energetisch model voor zowel het unimodaal als het multimodaal transport. Deze stap is identiek aan het in hoofdstuk vier besproken energetisch haalbaarheidsmodel. Daarom zullen hier de reeds vereenvoudigde kostenfuncties weergeven. We verwijzen naar het deel '4.6: Energetisch haalbaarheidsmodel' in hoofdstuk vier voor meer informatie omtrent de vereenvoudiging van de kostenfunctie.

Voor **het unimodaal wegvervoer** bekwamen we de volgende uitdrukking:

$$T.EN.K.U = C_{AB} \times d_{AB} + C_U$$

Symbool	Verklaring
T.EN.K.U	Totale energetische kost unimodaal wegvervoer in kWh/ton
C_{AB}	Variabele energetische kost unimodaal wegvervoer in kWh/tonkm
d_{AB}	Afstand van onderneming A naar B over de weg in km
C_U	Vaste energetische kost unimodaal wegvervoer in kWh/ton

Voor het **multimodaal vervoer** kunnen we de kostenfunctie weergeven als volgt:

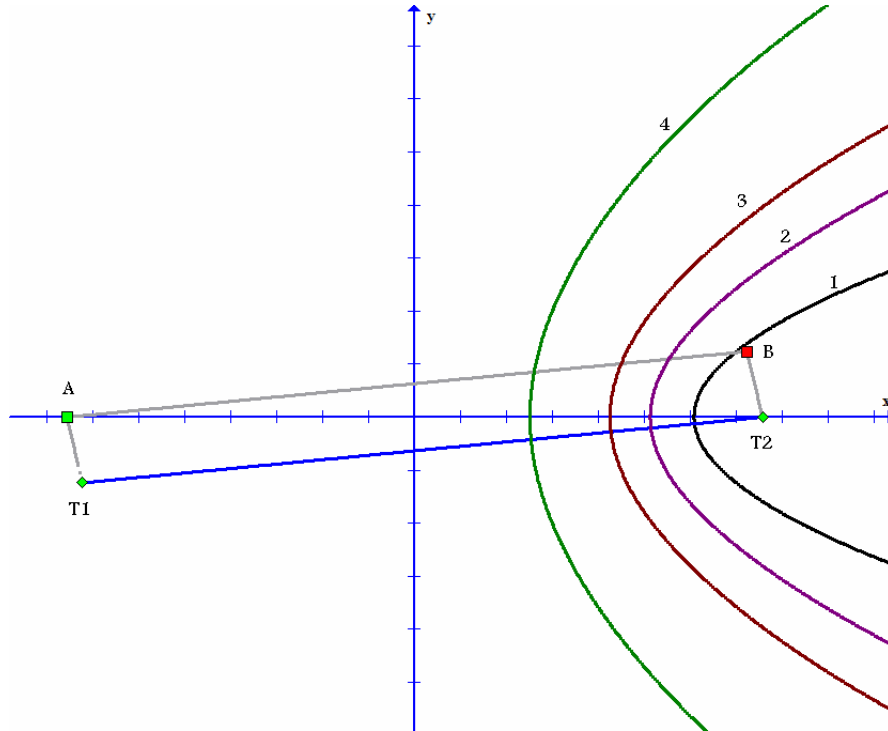
$$T.EN.K.M = \underbrace{d_{AT1} \times C_{AT1} + C_V}_{\text{voortransport}} + \underbrace{d_{T1T2} \times C_{T1T2} + C_H}_{\text{hoofdtransport}} + \underbrace{d_{T2B} \times C_{T2B} + C_N}_{\text{natransport}}$$

Om de formule van de energetisch eivormige figuur te bekomen, volstaat het de bovenstaande elementen in te vullen in de formules van het algemeen haalbaarheidsmodel.

5.8 : Vergelijken van de economische, sociaal-economische, ecologische en energetische modellen

Zoals bij de haalbaarheidshyperbolen in hoofdstuk vier, maken de verschillende modellen in dit hoofdstuk gebruik van dezelfde basisvergelijking. De resultaten die bekomen worden zullen echter verschillend zijn naar gelang het gebruikte model. Zoals we reeds in het vorige hoofdstuk hebben aangetoond, zal het multimodaal binnenvaarttraject beter 'scoren' in het ecologisch en sociaal-economisch model dan in het economisch model. Net zoals bij de haalbaarheidshyperbolen, kunnen we dit grafisch controleren door de positie en grote van de verschillende eivormige figuren te vergelijken met elkaar. Des te groter het eivormige gebied van een model, des te beter het

multimodaal traject hierop 'scoort'. Het beter 'scoren' van een alternatief op een bepaald model betekend simpelweg dat het haalbaarheidsgebied van dit model groter is dan andere. Het zegt niets over de specifieke haalbaarheid van een transportalternatief. In figuur 5.6 geven we een plausibel resultaat weer voor de afweging van het unimodaal wegvervoer en het multimodaal binnenvaarttransport op basis van de vier hierboven besproken modellen.



Figuur 5.6: Voorstelling van de breakeven eivormige figuren van het economisch (1), het sociaal-economisch (2), het energetisch (3) en het ecologisch model (4). Het multimodaal binnenvaarttransport scoort relatief het beste op het energetisch model (4) en relatief het slechtste op het economisch model (1).

In het bovenstaande voorbeeld blijkt dat het multimodaal traject voor elk model voordeliger is dan het unimodaal wegtransport. Desalniettemin scoort het ecologisch model relatief het beste en het economisch model relatief het slechtste voor het multimodaal traject. Indien we kijken naar het unimodaal wegvervoer, dan kunnen we een omgekeerde conclusie maken: het economisch model scoort relatief het beste en het energetisch scoort relatief het slechtste.

5.9 : Sensitiviteitsanalyse van het algemeen haalbaarheidsmodel met $C_{T2B} \neq C_{AB}$

5.9.1 : Inleiding

Net zoals in het vorige hoofdstuk zullen we in dit onderdeel onderzoeken in welke mate het resultaat van het haalbaarheidsmodel beïnvloed wordt door een verandering van methode, waarde van parameters en variabelen. Op basis van deze informatie kunnen we de variabelen en parameters identificeren die het resultaat van het haalbaarheidsmodel het meest beïnvloeden. Deze sensitiviteitsanalyse, welke we in dit onderdeel uitvoeren, is toepasbaar op zowel het economisch, sociaal-economisch, ecologisch en energetisch model.

Bij de afleiding van de breakeven eivormige figuur, bekwamen we de volgende vergelijking:

$$Y = y^2 = C^2 \times \frac{[C_{T2B}^2 + C_{AB}^2]}{[C_{T2B}^2 - C_{AB}^2]^2} + \frac{C_{T2B}^2 + C_{AB}^2}{C_{T2B}^2 - C_{AB}^2} \times 2x|x_A| - [x^2 + x_A^2] - \frac{2C_{AB}C_{T2B}C}{[C_{T2B}^2 - C_{AB}^2]^2} \times \sqrt{C^2 + 4[C_{T2B}^2 - C_{AB}^2]} \times x|x_A|$$

Om de sensitiviteitsanalyse goed te kunnen uitvoeren, gaan we de impact van wijzigingen berekenen op de lengte van ellips en het beginpunt. Bij de afleiding hebben we reeds het begin- en eindpunt berekend. Deze kwamen overeen met de volgende uitdrukking:

$$x_1 = \frac{C + (C_{T2B} - C_{AB}) \times |x_A|}{C_{T2B} + C_{AB}} \quad x_2 = \frac{(C_{T2B} + C_{AB}) \times |x_A| - C}{C_{T2B} - C_{AB}} \quad (1)$$

Aangezien de lengte van de ellips gelijk is aan het verschil van het eindpunt x_2 en het beginpunt x_1 , bekomen we de volgende formule:

$$x_2 - x_1 = \frac{(C_{T2B} + C_{AB})^2 |x_A| - (C_{T2B} + C_{AB})C - (C_{T2B} - C_{AB})C + (C_{T2B} - C_{AB})^2 |x_A|}{C_{T2B}^2 - C_{AB}^2} \quad (2)$$

$$x_2 - x_1 = 2 \times \left[\frac{(C_{T2B}^2 + C_{AB}^2) \times |x_A| - C_{T2B} \times C}{C_{T2B}^2 - C_{AB}^2} \right]$$

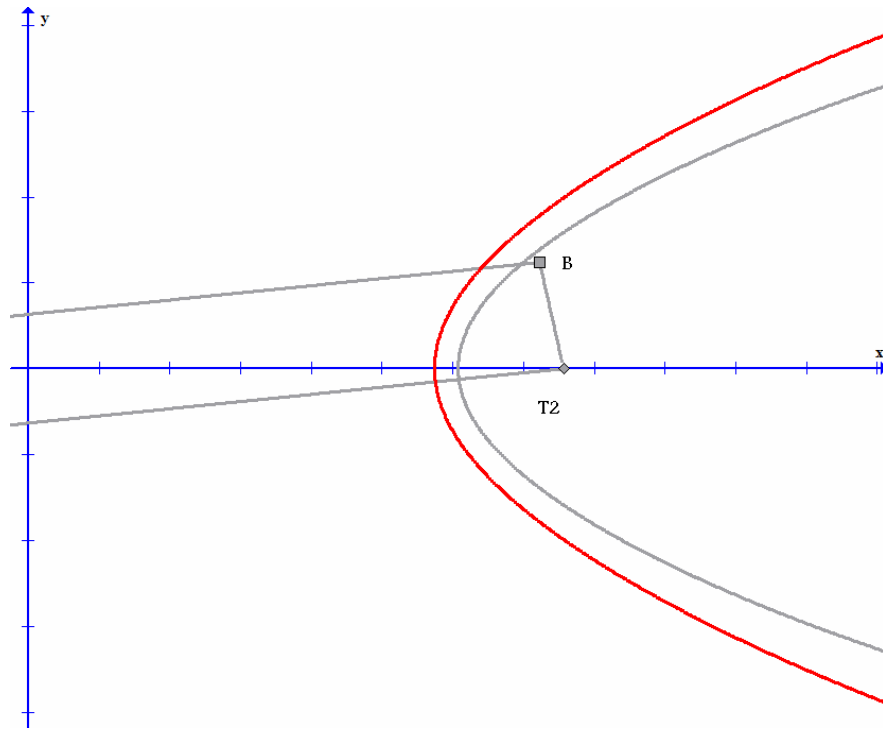
Symbol	Betekenis
C_{AT1}	Variabele kost voortransport in EUR/tonkm
C_{AB}	Variabele kost unimodaal transport in EUR/tonkm
C_{T1T2}	Variabele kost hoofdtransport in EUR/tonkm
C_{T2B}	Variabele kost natransport in EUR/tonkm
d_{AT1}	Afstand tussen onderneming A en terminal T_1 over de weg in km
d_{T1T2}	Afstand tussen terminal T_1 en T_2 over het kanaal of waterweg in km
d_{T2B}	Afstand tussen terminal T_2 en eindbestemming B over de weg in km
C_V	Vaste kost voortransport in EUR/ton
C_H	Vaste kost hoofdtransport in EUR/ton
C_N	Vaste kost natransport in EUR/ton

In dit deel gaan we op zoek naar het effect van de volgende zeven veranderingen.

1. een wijziging van de kostenverhouding unimodaal/hoofdtransport
2. een wijziging van de lengte van het voortransport
3. een verandering in de vaste kosten : o.a. overslagkosten
4. een wijziging van de gemiddelde snelheid van een specifieke modus
5. een verandering in de parameter β
6. integreren van externe kosten
7. een verandering in de procentuele bezettingsgraad van een specifieke modus

5.9.2 : Geval 1 : Wijziging verhouding $\frac{C_{AB}}{C_{T1T2}}$

Net zoals bij de sensitiviteitsanalyse van de hyperbool, gaan we uit van een wijziging van de verhouding van de variabele kost van het unimodaal wegvervoer, C_{AB} , over de variabele kost van het hoofdtransport van het multimodaal vervoer, C_{T1T2} . Aangezien we bij de afleiding van de ellips verondersteld hebben dat C_{AB} verschillend is van C_{AT1} en C_{T2B} , gaan we er hier vanuit dat de twee laatste parameters constant blijven. De wijzigingen in de breakeven ellips kunnen we als volgt voorstellen:



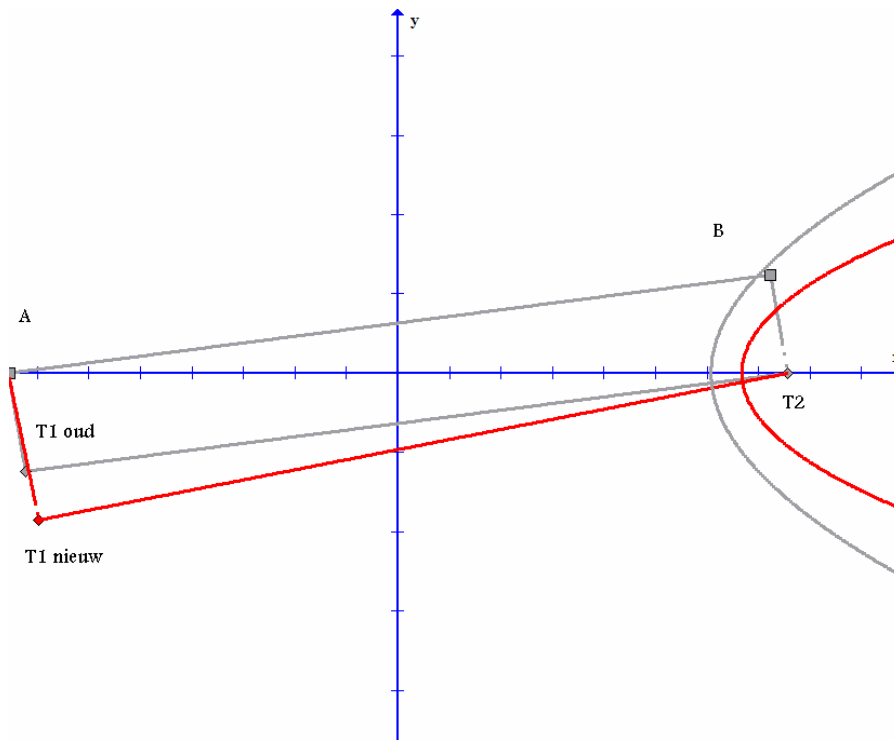
Figuur 5.7 : Wijziging van de breakeven eivormige figuur veroorzaakt door een stijging van de verhouding C_{AB} over C_{T2B} en $\beta = 1.1$. Dit betekent dat de verhouding van de kost per tonkm van het unimodaal transport over de kost per tonkm van het multimodaal hoofdtraject toeneemt. Hierdoor wordt de eivormig haalbaarheidsgebied groter. De grijze figuur is de oorspronkelijke en de rode de nieuwe.

Indien we de verhouding vergroten gaan we van de grijze ellips naar de rode breakeven ellips. We kunnen dus concluderen dat bij een stijging in de verhouding C_{AB} op C_{T1T2} , de ellips breder wordt en aldus het rentabiliteitsgebied uitgebreid wordt. De omgekeerde redenering is ook geldig : een daling in de verhouding C_{AB} op C_{T1T2} zal zowel de ellips als het rentabiliteitsgebied verkleinen. Indien we er vanuit gaan dat bij een stijging van C_{AB} de parameters C_{AT1} en C_{T2B} ook met een evenredig percentage stijgen, dan blijven bovenvermelde resultaten nog steeds geldig hoewel het effect minder uitgesproken is.

Analytisch kan dit effect als volgt verklaard worden: de ellips verschuift naar links doordat vergelijking (1) kleiner wordt aangezien een grotere C_{AB} of een kleinere C_{T2B} zorgt voor een kleinere beginpositie. De ellips wordt groter omdat door een stijging van C_{AB} of daling van C_{T2B} , vergelijking (2) groter wordt en aldus de afstand tussen begin- en eindpunt toeneemt: ellips wordt groter.

5.9.3 : Geval 2 : Een wijziging in de afstand van het voortransport (d_{AT1})

We beogen hier het effect op de breakeven ellips weer te geven van een ceteris paribus wijziging van de lengte van het voortransport. In de onderstaande figuur zijn we uitgegaan van een stijging van 50% ten opzichte van de oorspronkelijke lengte.



Figuur 5.8 : Wijziging van de breakeven eivormige figuur veroorzaakt door een 50% stijging in de afstand van het voortransport, $\beta = 1.1$. Aangezien het multimodaal traject toeneemt en het unimodaal niet, zal de nieuwe breakeven eivormige figuur (rood) kleiner worden. Het gevolg is dat het haalbaarheidsgebied kleiner wordt, en de eindbestemming B er niet meer in ligt. Het unimodaal traject (d_{AB}) is nu voordeliger dan het multimodaal traject.

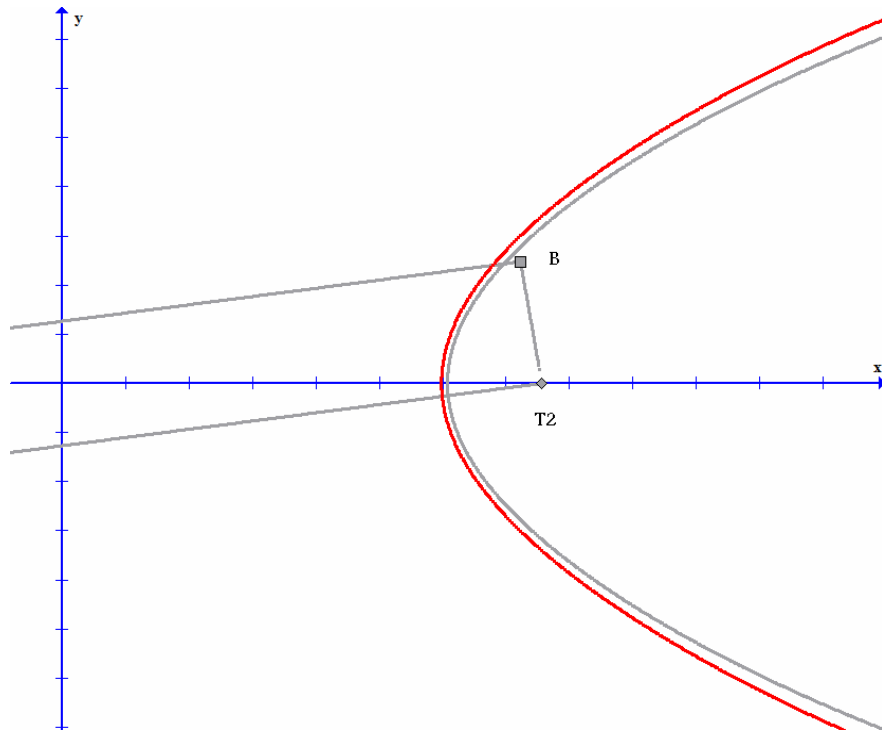
We kunnen duidelijk uit bovenstaande figuur afleiden dat een ceteris paribus stijging van de voortransport afstand, leidt tot een smallere ellips en een kleiner rentabiliteitsgebied. In het bovenstaand geval is de verkleining van de ellips zelfs zo groot dat het niet meer economisch rendabel is om goederen via de multimodale weg te transporteren van onderneming A naar B. Uiteraard is de omgekeerde redenering ook juist: bij een daling van de voortransport afstand zal de breakeven ellips groter worden en zal het rentabiliteitsgebied uitgebreid worden.

Analytisch kunnen we dit effect als volgt verklaren: Door een stijging van d_{AT1} zal de parameter C toenemen. Hierdoor zal vergelijking (1) groter worden waardoor het beginpunt, en de ellips, naar rechts verschuift. De ellips zal kleiner worden omdat door de stijging van C, vergelijking (2) daalt, waardoor de afstand tussen begin- en eindpunt kleiner wordt.

5.9.4 : Geval 3 : Een verandering in vaste kosten

Een wijziging van de vaste kosten van enerzijds het unimodaal en anderzijds het multimodaal systeem, zal een impact hebben op de breakeven ellips. Aangezien de vaste kosten van het multimodaal systeem opgeteld worden bij de parameter C en de vaste kosten van het unimodaal systeem afgetrokken worden van parameter C, spreken we hier over ofwel een netto toename van de vaste kosten, ΔC is positief, of een netto afname van de vaste kosten, ΔC is negatief. Een heel belangrijke vaste kost bij het multimodaal transport is de overslagkost. Het heeft een grote invloed op

de haalbaarheid van het multimodaal traject. Vandaar dat we in de onderstaande figuur nagaan wat het effect is van een 10% afname van kost van overslag. Deze afname van de kost van overslag kan verklaard worden door het toepassen van de leercurve.



Figuur 5.9 : Wijziging van de breakeven eivormige figuur uitgaande van een daling van 10% in de overslagkosten en een β van 1.1. Aangezien de vaste kosten van het multimodaal traject afnemen, zal de breakeven eivormige figuur en het daaruit volgend haalbaarheidsgebied vergroten. De grijze figuur is de oorspronkelijke en de rode hyperbool de nieuwe.

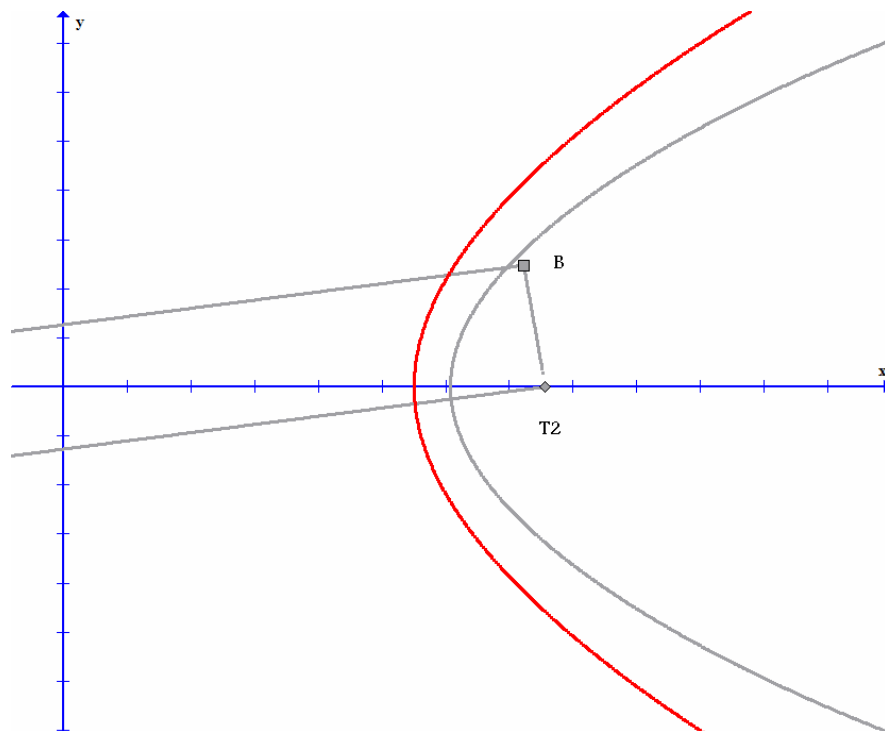
Uit bovenstaande figuur blijkt dat een netto afname van de vaste kosten leidt tot een grotere breakeven ellips. Uiteraard zal een netto stijging van de vaste kosten leiden tot een verkleining van enerzijds het rentabiliteitsgebied en anderzijds de ellips.

Analytisch kunnen we dit effect als volgt verklaren: Door een daling van de vaste kosten zal de parameter C afnemen. Hierdoor zal vergelijking (1) kleiner worden waardoor het beginpunt, en de ellips, naar links verschuift. De ellips zal groter worden omdat door de daling van C, vergelijking (2) stijgt, waardoor de afstand tussen begin- en eindpunt groter wordt.

5.9.5 : Geval 4 : Een wijziging van de gemiddelde snelheid van een specifieke modus

Ook bij de breakeven ellips is er een verband tussen de gemiddelde snelheid van een vervoersmodus en de vorm van de ellips. Bij de uiteenzetting van de totale transportkost hebben we bepaald dat de kilometercoëfficiënt van zowel het unimodaal wegvervoer als het multimodaal vervoersysteem bestaat uit drie elementen, met name de directe interne kosten, de externe kosten en de voorraadkost tijdens het transport. Net zoals bij de hyperbool wordt de link tussen de gemiddelde snelheid en de grootte van de breakeven ellips veroorzaakt door de directe transportkosten en de in transit en

veiligheidsvoorraad kosten tijdens het transport. De eerste link kan verklaard worden doordat men de tijdvariabele kosten, onderdeel van de directe transportkosten, dient te herleiden naar kilometervariabele kosten. Dit doen we door de tijdskosten te delen door de gemiddelde snelheid. Dus des te lager de gemiddelde snelheid, des te hoger de interne kosten zullen zijn. De tweede link wordt veroorzaakt doordat we bij de berekening van de in transit en veiligheidsvoorraad kosten, de gemiddelde snelheid van de gebruikte modus nodig hebben om de gemiddelde transportduur in jaren te berekenen. Een hogere gemiddelde snelheid geeft een lagere in transit en veiligheidsvoorraad en een lagere gemiddelde snelheid leidt tot een hogere voorraad. In onderstaande figuur wordt het effect weergegeven van een daling van de gemiddelde snelheid van het unimodaal vrachtvervoer. Hierbij gaan we ervan uit dat de snelheid van het voor- en natransport dezelfde blijft.

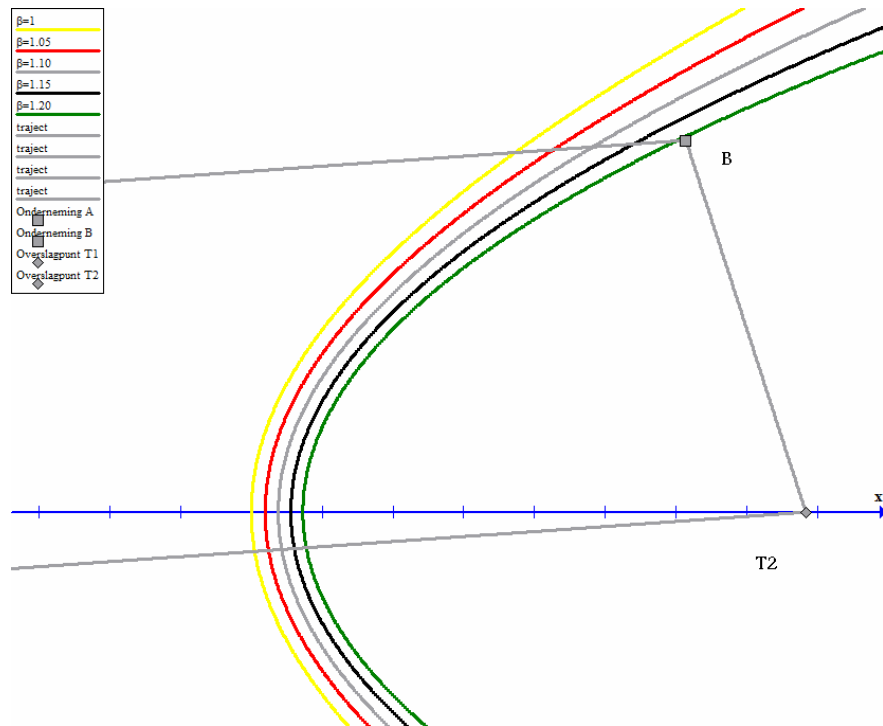


Figuur 5.10 : Wijziging van de breakeven eivormige figuur uitgaande van een daling van de gemiddelde snelheid unimodaal transport ceteris paribus en een β van 1.1. Een daling van de gemiddelde snelheid zal zorgen voor een stijging in de in transit voorraad, de veiligheidsvoorraad en de interne transportkosten. De totale kosten van het unimodaal traject stijgen. Hierdoor zal de breakeven afstand van het multimodaal traject dalen. De breakeven eivormige figuur en het haalbaarheidsgebied worden groter. De grijze figuur is de oorspronkelijke en de rode hyperbool weerspiegeld de nieuwe situatie.

Uit bovenstaande figuur kunnen we afleiden dat een daling van de gemiddelde snelheid van het unimodaal transport ceteris paribus leidt tot een vergroting van de ellips en zijn rentabiliteitsgebied. We bekommen dezelfde conclusie als de gemiddelde snelheid van het hoofdtransport toeneemt. Bij een daling van de gemiddelde snelheid van het hoofdtransport en/of stijging van de gemiddelde snelheid van het unimodaal transport, zal de ellips en zijn rentabiliteitsgebied kleiner worden.

5.9.6 : Geval 5 : Een verandering in de parameter β

De parameter β staat voor de verhouding C_{T2B} over C_{AB} , en geeft met andere woorden de relatieve variabele kost weer van het natransport ten opzichte van het unimodaal wegvervoer. Aangezien we er vanuit gaan dat $C_{AT1} = C_{T2B}$, kan de parameter ook geïnterpreteerd worden in termen van de relatieve variabele kost van het voortransport. Logischerwijs veronderstellen we dat de variabele kost van het voor- en natransport steeds groter is als de variabele kost van het unimodaal transport, waardoor steeds $\beta \geq 1$. Indien $\beta = 1$ dan bekomen we geen ellips meer maar wel de breakeven hyperbool. Des te groter β , des te kleiner de vorm van de ellips en des te meer het naar de rechter kant verschuift. We dienen echter op te merken dat de ellips nooit verder dan het punt T_2 kan verschoven worden.



Figuur 5.11 : Wijziging breakeven eivormige figuur met geel $\beta=1$; rood $\beta=1.05$; grijs $\beta=1.1$; zwart $\beta=1.15$; groen $\beta=1.2$. Des te groter de β parameter, des te kleiner het eivormig haalbaarheidsgebied wordt.

Analytisch kan dit effect als volgt verklaard worden: door een toename van β zal vergelijking (1) toenemen, waardoor het beginpunt en dus ook de ellips naar rechts verschuift. De ellips wordt kleiner bij een toenemende β aangezien vergelijking (2) daalt, en hiermee de afstand tussen het begin- en eindpunt kleiner wordt.

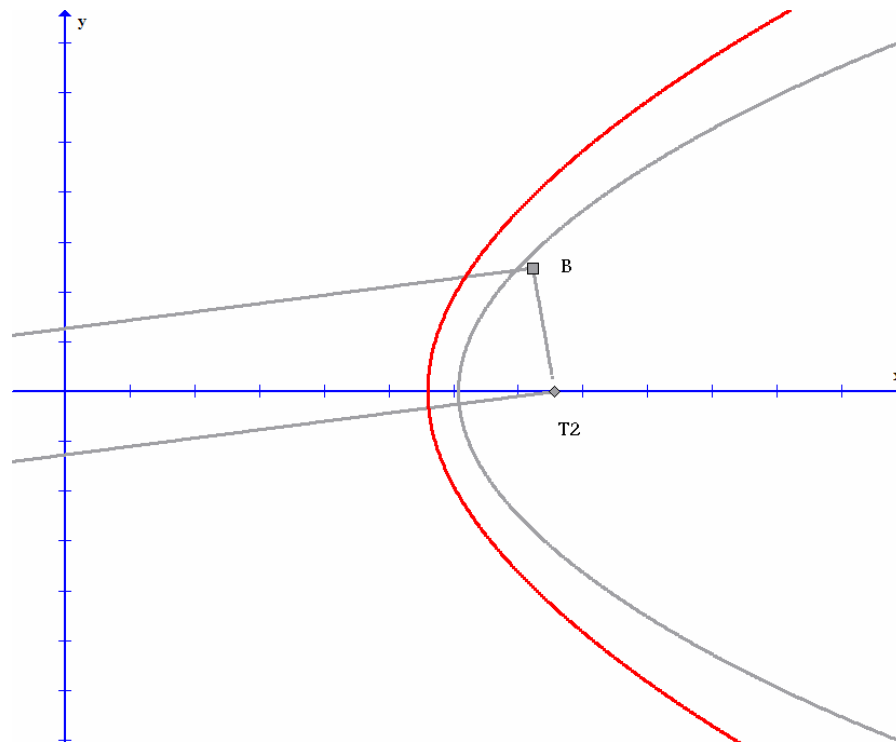
5.9.7 :Geval 6 : integreren van externe kosten

Externe kosten zijn kosten van externe effecten, welke door de veroorzaker niet of onvolledig in zijn besluitvorming worden ingecalculleerd. Deze kosten bestaan uit zowel kilometer en tijdsafhankelijk als constant kosten. De kilometer en tijdsafhankelijk kosten zullen we integreren in de kilometercoëfficiënt. Het constante deel van de externe kosten voegen we toe aan de parameter C . Het effect van deze integratie op de breakeven eivormige figuur is voor de integratie van de kilometer en tijdsafhankelijk externe kosten dezelfde als een toename in de verhouding C_{AB} op C_{AT1} . De

integratie is gelijk aan een toename van de verhouding C_{AB} op C_{AT1} omdat de externe kosten van het unimodaal wegvervoer aanzienlijk hoger zijn dan die van het multimodaal transportsysteem. (Hoofdstuk drie) Het effect van de integratie van het constante deel van de externe kosten komt op zijn beurt overeen met de wijziging in vaste kosten, onderdeel 5.8.4.

5.9.8 : Geval 7 : Een wijziging in de procentuele bezettingsgraad van een vervoersmodus

Zoals we reeds uitgelegd hebben bij de sensitiviteitsanalyse van de breakeven hyperbool, zijn we bij de berekening van de variabele transportkosten steeds uitgegaan van een impliciete bezettingsgraad. Indien deze bezettinggraad wijzigt, zullen de variabele transportkosten niet constant blijven. Zo zal bij een stijging van de bezettingsgraad de variabele kost per ton dalen, aangezien bepaalde kostenelementen minder zwaar per tonkilometer doorwegen. Deze wijziging in de variabele kostenstructuur zal de vorm van de breakeven ellips beïnvloeden. De volgende figuur geeft het effect weer van een stijging in de bezettingsgraad ceteris paribus van een binnenvaartschip.



Figuur 5.12 : Wijziging breakeven eivormige figuur veroorzaakt door een 20% stijging in de bezettingsgraad van het gebruikte binnenvaartschip. De interne transportkost per tonkm is afhankelijk van de bezettingsgraad van de gebruikte modus. Des te hoger de bezetting, des te lager de interne transportkost per tonkm en des te lager de totale transportkost per tonkm. Het gevolg is dat het eivormig haalbaarheidsgebied kleiner wordt. De grijze figuur geeft de oorspronkelijke situatie weer, en de rode figuur de nieuwe. In de nieuwe situatie is het unimodaal traject voordeliger dan het multimodale.

Uit bovenstaande figuur kunnen we concluderen dat een stijging in de bezettingsgraad van de binnenvaart zou leiden tot een grotere breakeven ellips. Ditzelfde effect zou verkregen worden indien de bezettingsgraad van de unimodale vrachtwagen zou dalen. We zouden een kleinere ellips krijgen,

wanneer ofwel de bezettingsgraad van de binnenvaart daalt of de bezettingsgraad van het unimodaal vervoer stijgt.

Analytisch kan het effect dat zich voordoet in bovenvermeld voorbeeld als volgt verklaard worden: door de stijging in de bezettingsgraad van een binnenschip zal de parameter C dalen, waardoor uit vergelijking (1) blijkt dat het beginpunt naar links verschuift. Door dezelfde daling van C, zal de afstand tussen begin- en eindpunt van de eivormige figuur groter worden. Dit volgt uit vergelijking (2).

Hoofdstuk 6 : Uitbreiding van de analytische haalbaarheidsmodellen

6.1 : Inleiding

Tot hiertoe zijn we er steeds van uitgegaan dat de onderneming die een transport moet organiseren de keuze dient te maken uit twee vervoersalternatieven, namelijk rechtstreeks wegvervoer of multimodaal vervoer. Uiteraard heeft de vervoergebruiker meer mogelijkheden en alternatieven om goederen te transporteren. Het doel van dit hoofdstuk is de modellen, welke we afgeleid hebben in hoofdstuk vier en vijf, aan te passen aan een grotere variëteit van transportbeslissingen. In het onderdeel 6.2 bespreken we de modelmatige analyse van de keuze van terminals bij het multimodaal transport, en het vergelijken van twee verschillende types van het multimodaal vervoer. In het onderdeel 6.3 passen we de modellen aan zodat ze niet twee, maar theoretisch een oneindig aantal transportalternatieven gelijktijdig met elkaar kunnen vergelijken. Aldus kan een onderneming al zijn verschillende transportalternatieven vergelijken met elkaar en duidelijk afgebakende haalbaarheidsgebieden per alternatief weergeven. In het deel 6.4 herzien we de topics van 6.2 in het licht van de modelmatige aanpassingen van het onderdeel 6.3.

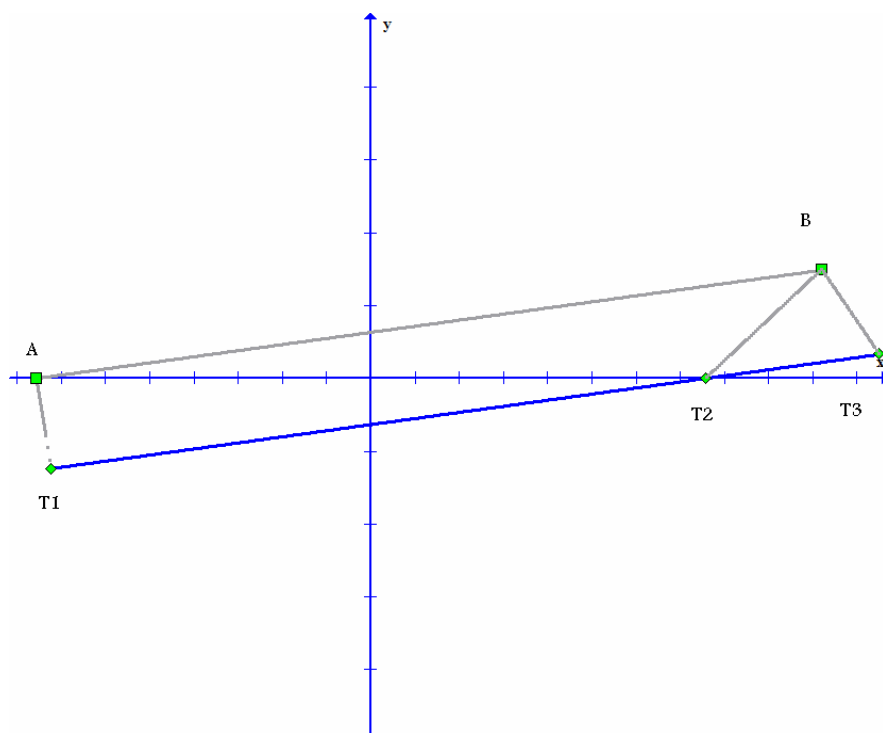
6.2 : Directe vergelijking van twee alternatieven : uitbreiding combinaties type alternatieven

6.2.1 : Modelmatige analyse van de keuze van terminals bij het multimodaal transport

Tot hiertoe gingen we er vanuit dat bij het multimodaal traject slechts één combinatie van overslagpunten beschikbaar was. Deze veronderstelling is in vele gevallen niet onrealistisch, aangezien men door het beperkt aantal en de grote geografische verspreiding van overslagterminals in België en de rest van Europa, weinig keuze heeft welke terminals zullen gebruikt worden in het multimodaal traject. We dienen hierbij wel te vermelden dat sedert enkele jaren het aantal terminals in België stijgt door de inzet van verschillende instellingen. Een voorbeeld hiervan is het kaaimuurproject. Een vervoergebruiker kan geconfronteerd worden met de aanwezigheid van verschillende overslagpunten in de nabijheid van de eindbestemming van het multimodaal traject. Beleidsmatig dient hij dan een terminal te kiezen. Door in dit onderdeel de keuze van overslagterminals in het multimodaal traject modelmatig te analyseren, willen we hier de taak van de beleidsnemer vergemakkelijken.

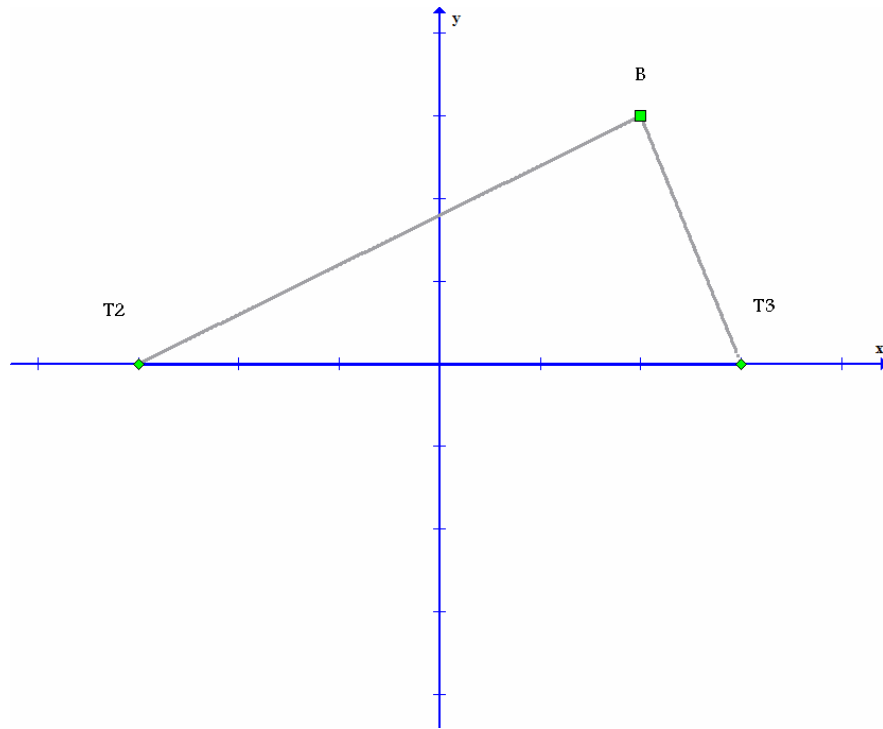
In deze paragraaf ontwikkelen we dus een methodiek om verschillende trajecten van één specifiek multimodaal transport met elkaar te vergelijken. We construeren een model welke ons toelaat het relevante gebied op te splitsen in twee delen. Een deelgebied waar het multimodale traject één voordeliger is als het tweede traject, en een ander deelgebied waar het omgekeerde geldt. Uiteraard zullen de haalbaarheidsregio's afhankelijk zijn van het gekozen kostenmodel, namelijk het traditioneel economisch, ecologisch, energetisch en sociaal-economisch.

In deze analyse nemen we aan dat goederen getransporteerd kunnen worden van onderneming A naar eindbestemming B via twee verschillende trajecten welke gebruik maken van eenzelfde multimodaal transportsysteem. We benoemen deze traject één en traject twee. Het eerste multimodale traject maakt gebruik van de overslagpunten T_1 en T_2 , het tweede traject gebruikt van de overslagpunten T_1 en T_3 . Het eerste overslagpunt is dezelfde voor beide alternatieven, namelijk terminal T_1 . Bij het tweede overslagpunt van het traject heeft men de keuze tussen terminal T_2 , traject één, en terminal T_3 , traject twee. Het hoofdtransport bij traject één doet zich voor tussen T_1 en T_2 , bij traject twee tussen T_1 en T_3 . De respectievelijke afstand van het hoofdtransport bedraagt $d_{T_1T_2}$ en $d_{T_1T_3}$, waarbij de eerste korter is dan de tweede. We kunnen beide transportalternatieven als volgt grafisch voorstellen:



Figuur 6.1 : Voorstelling van de keuze van terminals. A is de verzendende onderneming en B is de eindbestemming. T_1 , T_2 en T_3 zijn de overslagterminals van het multimodaal transport. Men dient de keuze te maken welke terminals men gaat gebruiken: $[T_1;T_2]$ of $[T_1;T_3]$.

Bij deze analyse zullen we opnieuw een breakeven hyperbool creëren, welke het gebied weergeeft waarbinnen eindbestemming B gevestigd dient te zijn zodat het multimodaal traject met eindterminal T_3 rendabeler is dan het alternatief, namelijk het traject met eindterminal T_2 . Om deze hyperbool te bekomen, vereenvoudigen we eerst de bovenstaande figuur. Aangezien we twee multimodale alternatieven met elkaar vergelijken, dienen we ons te concentreren op de driehoek met hoekpunten B, T_2 en T_3 . We positioneren de twee overslagpunten op de x-as, zodanig dat de y-as de middelloodlijn is van het lijnstuk $[T_2;T_3]$. We verkrijgen aldus de volgende figuur.



Figuur 6.2 : Nieuwe voorstelling van de keuze van terminals. Met B de eindbestemming en T₂ en T₃ de mogelijke overslagterminals. De x-as is het lijnstuk [T₂;T₃] en de y-as is de middelloodlijn van dit lijnstuk.

We stellen de totale transportkosten van beide multimodale trajecten aan elkaar gelijk. Hoewel beide trajecten vertrekken uit onderneming A en langs terminal T₁ en T₂ gaan, kunnen we de hiermee gepaard gaande kosten niet verwaarlozen. De reden hiertoe is dat de gebruikte modus voor het hoofdtransport voor de twee trajecten in laadcapaciteit kunnen verschillen van elkaar. Vandaar de notatie $C'_{T_1T_2}$ voor traject twee in plaats van $C_{T_1T_2}$ welke gebruikt wordt voor traject één. We krijgen aldus volgende vergelijking:

$TTK_1 = \text{Totale transportkost traject 1}$

$$TTK_1 = d_{AT} \times C_{AT} + d_{T_1T_2} \times C_{T_1T_2} + d_{T_2B} \times C_{T_2B} + \text{Overslag}_{T_1} + \text{Overslag}_{T_2} + C_{Traject1}$$

$TTK_2 = \text{Totale transportkost traject 2}$

$$TTK_2 = d_{AT} \times C_{AT} + d'_{T_1T_2} \times C'_{T_1T_2} + d_{T_2T_3} \times C_{T_2T_3} + d_{T_2B} \times C_{T_2B} + \text{Overslag}_{T_1} + \text{Overslag}_{T_3} + C_{Traject2}$$

$$TTK_1 = TTK_2$$

$$d_{T_1T_2} \times C_{T_1T_2} + d_{T_2B} \times C_{T_2B} + \text{Overslag}_2 + C_{Traject1} =$$

$$d'_{T_1T_2} \times C'_{T_1T_2} + d_{T_2T_3} \times C_{T_2T_3} + d_{T_3B} \times C_{T_3B} + \text{Overslag}_3 + C_{Traject2}$$

In de bovenstaande vergelijking zal enkel d_{T2B} en d_{T3B} variabel zijn aangezien we de plaats van overslagpunt T_2 en T_3 als gegevens beschouwen. Als we alle variabele kosten overbrengen naar het linkerlid en alle niet-variabele kosten overbrengen naar het rechterlid, bekomen we de volgende uitdrukking.

$$d_{T2B} \times C_{T2B} - d_{T3B} \times C_{T3B} = d_{T2T3} \times C_{T2T3} + \text{Overslag}_{T3} + C_{\text{Traject2}} - \text{Overslag}_{T2} - C_{\text{Traject1}} + d_{T1T2} \times [C'_{T1T2} - C_{T1T2}]$$

Indien we zowel het rechter als het linker lid delen door C_{T2B} , verkrijgen we :

$$d_{T2B} - \frac{d_{T3B} \times C_{T3B}}{C_{T2B}} = \frac{d_{T2T3} \times C_{T2T3} + \text{Overslag}_{T3} + C_{\text{Traject2}} - \text{Overslag}_{T2} - C_{\text{Traject1}}}{C_{T2B}} + \frac{d_{T1T2} \times [C'_{T1T2} - C_{T1T2}]}{C_{T2B}}$$

Aangezien het rechterlid een deling is van een constante door een constante, kunnen we deze vervangen door K . Verder gaan we ervan uit dat $C_{T3B} = C_{T2B}$, met andere woorden: de kost per tonkm van het natransport voor traject één stemt overeen met die van traject twee. We veronderstellen met andere woorden dat ze over dezelfde natransportinfrastructuur beschikken. Indien dit laatste niet het geval zou zijn dan zal $C_{T3B} \neq C_{T2B}$. Voor de analyse van deze laatste situatie verwijzen we naar onderdeel 6.2.2. Indien de kost van het natransport per tonkm voor beide alternatieven dezelfde zijn, dan bekomen we uiteindelijk onderstaande vergelijking:

$$d_{T2B} - d_{T3B} = K \quad (1)$$

We dienen d_{T2B} en d_{T3B} te vertalen naar x en y coördinaten. Hiervoor maken we gebruik van de stelling van Pythagoras op figuur 6.2. We krijgen onderstaande vergelijkingen:

$$d_{T2B}^2 = (x + |x_{T2}|)^2 + y^2$$

$$d_{T3B}^2 = (x_{T3} - x)^2 + y^2$$

Aangezien de y -as de middelloodlijn is van het lijnstuk $[T_2; T_3]$, zal de waarde $|x_{T2}|$ steeds gelijk zijn aan x_{T3} . Indien we beide vergelijkingen aftrekken van elkaar, bekomen we onderstaande gelijkheid:

$$d_{T2B}^2 - d_{T3B}^2 = x^2 + 2x_{T3}x + x_{T3}^2 + y^2 - x_{T3}^2 - 2x_{T3}x - x^2 - y^2 = 4x_{T3}x \quad (2)$$

De uitdrukking $d_{T2B}^2 - d_{T3B}^2$ kunnen we ook bekomen door een simpele transformatie van vergelijking (1).

$$\begin{aligned}d_{T2B}^2 &= (K + d_{T3B})^2 \\d_{T2B}^2 &= K^2 + 2Kd_{T3B} + d_{T3B}^2 \quad (3) \\d_{T2B}^2 - d_{T3B}^2 &= K^2 + 2Kd_{T3B}\end{aligned}$$

We stellen vergelijking (3) gelijk aan vergelijking (2) en vereenvoudigen.

$$\begin{aligned}K^2 + 2Kd_{T3B} &= 4x_{T3}x \\d_{T3B} &= \left(\frac{4x_{T3}x}{2K} - \frac{K^2}{2} \right) \quad (4)\end{aligned}$$

Bovenstaande vergelijking heeft twee onbekenden, maar er is nog geen verband tussen x en y. We lossen dit op door d_{T3B} te vervangen door zijn Pythagoras uitdrukking.

$$\begin{aligned}d_{T3B}^2 &= \left(\frac{4x_{T3}x}{2K} - \frac{K^2}{2} \right)^2 \\(x_{T3} - x)^2 + y^2 &= \left(\frac{4x_{T3}x}{2K} - \frac{K^2}{2} \right)^2\end{aligned}$$

We werken zowel het rechter- als linkerlid verder uit.

$$x_{T3}^2 - 2x_{T3}x + x^2 + y^2 = \frac{4x_{T3}x}{k^2} + \frac{k^2}{4} - 2x_{T3}x$$

$$x^2 \left(\frac{K^2 - 4x_{T3}^2}{K^2} \right) + y^2 = \frac{K^2 - 4x_{T3}^2}{4}$$

$$\frac{4x^2}{K^2} + \frac{4y^2}{(K^2 - 4x_{T3}^2)} = 1$$

Deze laatste vergelijking kan als volgt geschreven worden.

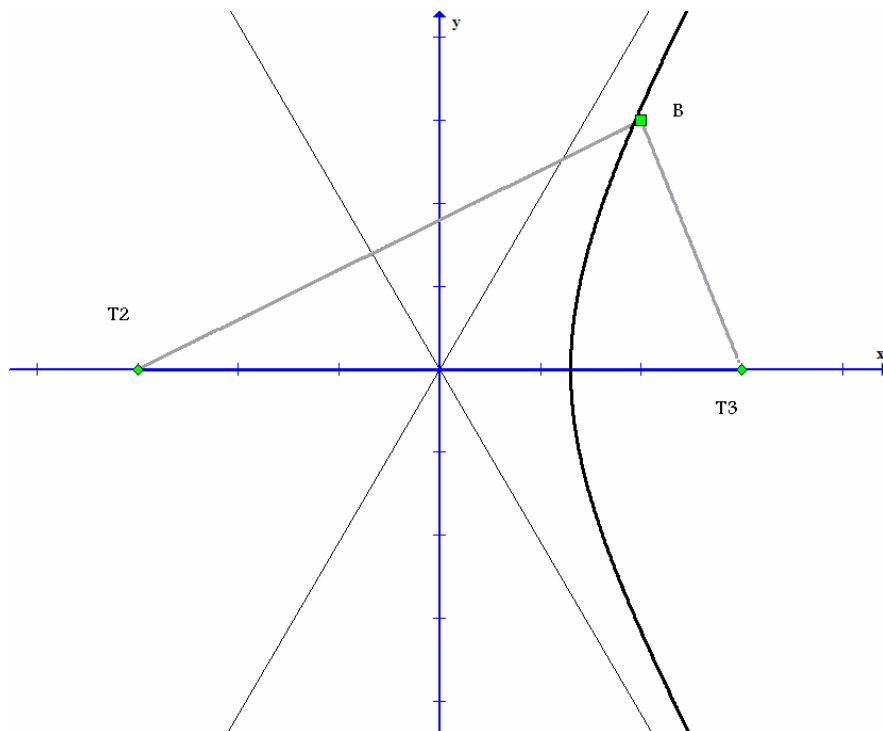
$$\left(\frac{2x}{K}\right)^2 + \left(\frac{2y}{\sqrt{K^2 - 4x_{T_3}^2}}\right)^2 = 1$$

Dit is de vergelijking van een hyperbool. We kunnen dus concluderen dat het gebied waar eindbestemming B gevestigd dient te zijn opdat het 2^{de} traject gunstiger is dan het eerste, weergegeven wordt door een hyperbool. Als eindbestemming B zich rechts van de hyperbool bevindt, dan zal het transport best via het 2^{de} traject gebeuren op basis van de toegepaste waarderingsmaatstaf. De asymptoten van de hyperbool kunnen analytisch als volgt weergegeven worden.

$$y = \pm \frac{\beta}{\alpha} x$$

$$\text{met } \beta = \frac{\sqrt{4x_{T_3}^2 - K^2}}{2} \text{ en } \alpha = \frac{K}{2}$$

Indien we de hyperbool en zijn asymptoten toepassen op bovenstaande figuur, bekommen we het volgende:



Figuur 6.3 : Voorstelling van breakeven hyperbool en asymptoten. Met B de eindbestemming en T₂ en T₃ de mogelijke overslagterminals. Indien B gelegen is aan de rechterzijde van de hyperbool, dan zal het multimodale traject via de terminal T₃ voordeliger zijn dan het traject via terminal T₂. Indien B

gelegen is aan de linkerkzijde van de hyperbool, dan zal het multimodale traject via de terminal T_2 voordeliger zijn dan het traject via terminal T_3 .

Aangezien eindbestemming B rechts ligt van de breakeven hyperbool, zal het rendabeler zijn om de goederen te transporteren via het tweede multimodaal traject, namelijk $A \rightarrow T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow T_3 \rightarrow B$.

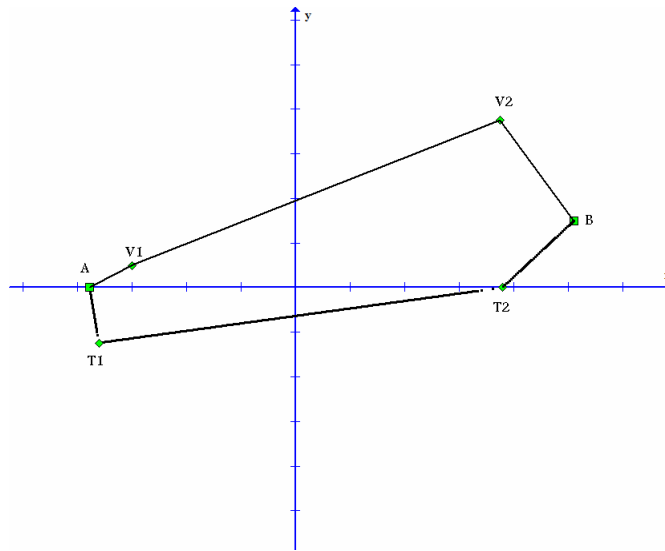
Men kan dit model gebruiken voor de keuze van terminals gebaseerd op zowel traditionele economische kosten als op externe, ecologische en energetische kosten. Men dient hierbij enkel de variabele en vaste kostenelementen in het model aan te passen. Deze kostenelementen vinden we terug in het algemeen rentabiliteitsmodel. Voor het gelijktijdig vergelijken van meer dan twee multimodale trajecten, verwijzen we de lezer naar het onderdeel 6.4.1 en volgende.

6.2.2 : Vergelijking twee verschillende types van multimodaal transport

In het vorige onderdeel hebben we de keuze besproken van overslagterminals in één specifiek multimodaal traject. Het is echter ook mogelijk dat er verschillende multimodale trajecten bestaan om de goederen van onderneming A naar eindbestemming B te transporteren. Deze trajecten verschillen van elkaar door de specifieke combinatie van modi waarvan ze gebruik maken. Zo kan men bijvoorbeeld naast de combinatie wegtransport/binnenvaart ook gebruik maken van het weg- en spoortransport.

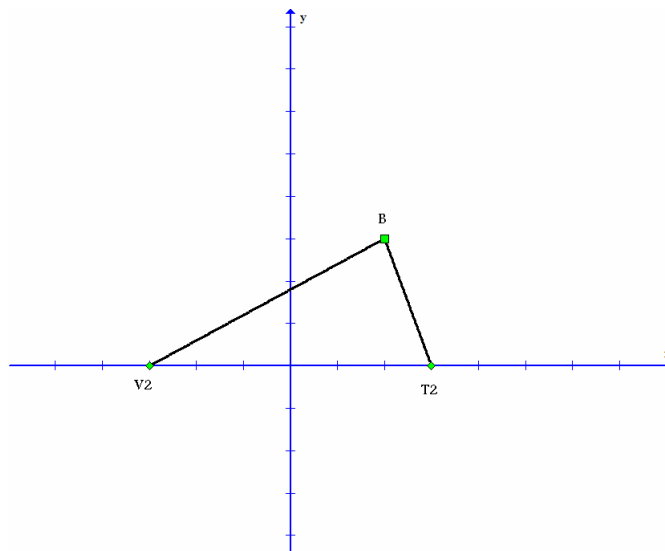
In deze paragraaf ontwikkelen we een methodiek om verschillende types van multimodaal transport met elkaar te vergelijken per twee. We construeren een model welke ons toelaat het relevante gebied op te splitsen in twee delen. Een deelgebied waar multimodaal type 1 rendabeler is als type 2, en een ander deelgebied waar het omgekeerde geldt. Uiteraard zullen de rendabiliteitsregio's afhankelijk zijn van het gekozen kostenmodel, namelijk het traditioneel economisch, ecologisch, energetisch en sociaal-economisch.

In deze analyse nemen we aan dat goederen getransporteerd kunnen worden van onderneming A naar eindbestemming B via twee verschillende multimodale transportsystemen. We benoemen deze type 1 en type 2. Het type 1 transportsysteem maakt gebruik van de overslagpunten T_1 en T_2 , het type 2 van V_1 en V_2 . Het hoofdtransport bij type 1 doet zich voor tussen T_1 en T_2 , bij type 2 tussen V_1 en V_2 . De respectievelijke afstand van het hoofdtransport bedraagt $d_{T_1T_2}$ en $d_{V_1V_2}$. We kunnen beide transportalternatieven als volgt grafisch voorstellen.



Figuur 6.4 : Voorstelling van twee verschillende multimodale transportsystemen. Met B de eindbestemming en T_1 en T_2 de overslagterminals van het eerste type multimodaal transport. V_1 en V_2 zijn de overslagterminals van het tweede type multimodaal transport.

Aangezien de kost per tonkm van het natransport voor de twee types transporttrajecten meer dan waarschijnlijk verschillend zijn, zullen we naar analogie met hoofdstuk vijf te werk gaan. We veronderstellen dus dat het type één multimodaal transport over een andere natransportinfrastructuur beschikt dan type twee. Dit houdt in dat we een eivormige figuur gaan creëren welke het gebied weergeeft waarin het type 1 multimodaal transport voordeliger is dan het type 2. Om deze figuur te bekomen, dienen we eerst de bovenstaande figuur te vereenvoudigen. Aangezien we twee multimodale alternatieven met elkaar vergelijken, dienen we ons te concentreren op de driehoek met hoekpunten B, T_2 en V_2 . We positioneren de twee overslagpunten op de x-as, zodanig dat de y-as de middelloodlijn is van het lijnstuk $[V_2; T_2]$. We verkrijgen aldus de volgende figuur.



Figuur 6.5 : Nieuwe voorstelling van twee verschillende multimodale transportsystemen. Met B de eindbestemming en V_2 en T_2 de laatste overslagterminal van respectievelijk het tweede en eerste type van multimodaal transport. De x-as is het lijnstuk $[V_2; T_2]$ en de y-as is de middelloodlijn van dit lijnstuk.

We stellen de totale transportkosten van beide multimodale trajecten aan elkaar gelijk. Aangezien in deze analyse enkel de coördinaten van het punt B variabel zijn, zullen de kosten van het voor- en hoofdtransport constant zijn voor zowel type één als twee. De enigste geassocieerde variabele kosten zijn die van het natransport. We krijgen aldus volgende vergelijkingen.

$TTK_1 = \text{Totale transportkost alternatief 1}$

$$TTK_1 = \underbrace{d_{AT1} \times C_{AT1}}_{\text{Voortransport}} + \underbrace{d_{T1T2} \times C_{T1T2}}_{\text{Hoofdtransport}} + \underbrace{d_{T2B} \times C_{T2B}}_{\text{Natransport}} + C_{\text{Alternatief 1}}$$

$TTK_2 = \text{Totale transportkost alternatief 2}$

$$TTK_2 = \underbrace{d_{AV1} \times C_{AV1}}_{\text{Voortransport}} + \underbrace{d_{V1V2} \times C_{V1V2}}_{\text{Hoofdtransport}} + \underbrace{d_{V2B} \times C_{V2B}}_{\text{Natransport}} + C_{\text{Alternatief 2}}$$

$TTK_1 = TTK_2$

$$\underbrace{d_{AT1} \times C_{AT1} + d_{T1T2} \times C_{T1T2} + C_{\text{Alternatief 1}}}_{\text{Constant}} + \underbrace{d_{T2B} \times C_{T2B}}_{\text{Variabel}} = \underbrace{d_{AV1} \times C_{AV1} + d_{V1V2} \times C_{V1V2} + C_{\text{Alternatief 2}}}_{\text{Constant}} + \underbrace{d_{V2B} \times C_{V2B}}_{\text{Variabel}}$$

Indien we de constante delen samenvoegen en vervangen door het symbool C, dan verkrijgen we onderstaande vergelijking.

$$\underbrace{d_{T2B} \times C_{T2B}}_{\text{Variabel}} + C = \underbrace{d_{V2B} \times C_{V2B}}_{\text{Variabel}}$$

$$d_{V2B} - d_{T2B} \times \frac{C_{T2B}}{C_{V2B}} = \frac{C}{C_{V2B}}$$

Zoals we reeds in het begin van deze paragraaf vermeld hebben, gaan we bij de afleiding van dit model er vanuit dat $C_{T2B} \neq C_{V2B}$. Deze stelling kan op de volgende manier geïnterpreteerd worden: de totale variabele natransportkost van het type één transportsysteem is verschillend van dat van het type twee.

Vooraleer we verder kunnen dienen we eerst de afstanden d_{V2B} en d_{T2B} te herleiden naar x en y coördinaten. Dit doen we door middel van de stelling van Pythagoras toe te passen op figuur 6.5. We bekomen de volgende vergelijkingen.

$$d_{V_2B}^2 = [x + |x_{V_2}|]^2 + [y - y_{V_2}]^2$$

$$d_{T_2B}^2 = [x - x_{T_2}]^2 + [y - y_{T_2}]^2$$

Aangezien de y-as fungeert als een middelloodlijn van het lijnstuk $[V_2, T_2]$, kunnen we concluderen dat $|x_{T_2}| = |x_{V_2}|$. Daarenboven kunnen we van de figuur afleiden dat y_{V_2} en y_{T_2} gelijk moeten zijn aan nul, omdat beide punten op de x-as gelegen zijn. We bekomen aldus de volgende vergelijkingen.

$$d_{T_2B} \times C_{T_2B} + C = d_{V_2B} \times C_{V_2B}$$

$$C_{T_2B} \times \sqrt{(x_2 - x_{T_2})^2 + y^2} + C = C_{V_2B} \times \sqrt{(x + |x_{T_2}|)^2 + y^2}$$

Verder vereenvoudigen we de voorstelling van de vergelijking door de volgende substituties door te voeren.

$$\begin{aligned} (x + |x_{T_2}|)^2 &= W & W + Y &= M \\ (x - x_{T_2})^2 &= V & V + Y &= N \\ y^2 &= Y \end{aligned}$$

Aldus verkrijgen we volgende vergelijking.

$$C_{T_2B} \times \sqrt{N} + C = C_{V_2B} \times \sqrt{M}$$

We kwadrateren beide leden.

$$C_{T_2B}^2 \times N + C^2 + 2C \times C_{T_2B} \sqrt{N} = C_{V_2B}^2 \times M$$

Opnieuw kwadrateren we beide leden en werken verder uit.

$$\begin{aligned} [C_{V_2B}^2 \times M - C_{T_2B}^2 \times N - C^2]^2 &= [2C \times C_{T_2B} \times \sqrt{N}]^2 \\ [C_{V_2B}^2 \times M - C_{T_2B}^2 \times N]^2 - 2C^2 [C_{V_2B}^2 \times M + C_{T_2B}^2 \times N] + C^4 &= 0 \end{aligned}$$

Deze laatste formule is enkel geldig wanneer $C_{V_2B}^2 \times M - C^2 - C_{T_2B}^2 \times N > 0$. Voor het verder verloop van de afleiding verwijzen we de lezer naar onderdeel 5.2 van het hoofdstuk vijf, meer specifiek pagina 110 ev. De lezer dient wel rekening te houden dat in deze context het symbool C_{AB} in hoofdstuk vijf dient vervangen te worden door het symbool C_{V_2B} .

Indien we dezelfde stappen volgen als in hoofdstuk vijf, bekommen we de volgende algemene vergelijking.

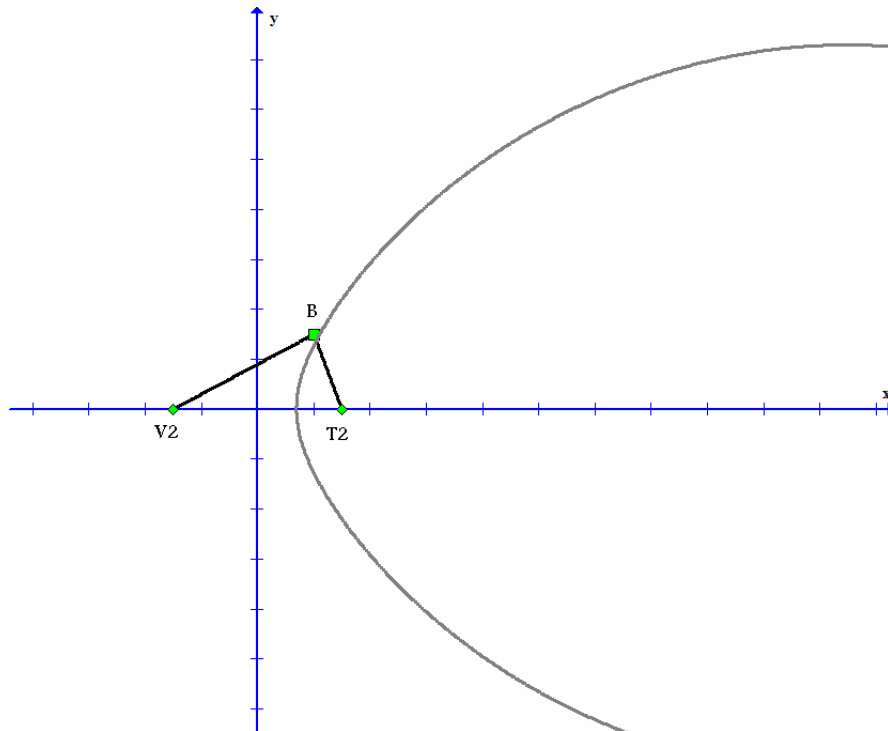
$$y^2 = C^2 \times \frac{[C_{T2B}^2 + C_{V2B}^2]}{[C_{T2B}^2 - C_{V2B}^2]^2} + \frac{C_{T2B}^2 + C_{V2B}^2}{C_{T2B}^2 - C_{V2B}^2} \times 2xx_{T2} - [x^2 + x_{T2}^2] - \frac{2C_{V2B}C_{T2B}C}{[C_{T2B}^2 - C_{V2B}^2]^2} \times \sqrt{C^2 + 4[C_{T2B}^2 - C_{V2B}^2]} \times xx_{T2}$$

We kunnen dus concluderen dat het haalbaarheidsgebied van type één transportsysteem ten opzichte van type twee een gesloten eindig gebied is , met andere woorden eivormig , met snijpunten met de x-as in X_1 en X_2 .

$$x_1 = \frac{C + [C_{T2B} - C_{V2B}] \times x_{T2}}{C_{T2B} + C_{V2B}}$$

$$x_2 = \frac{[C_{T2B} + C_{V2B}] \times x_{T2} - C}{C_{T2B} - C_{V2B}}$$

Indien we grafisch deze eivormige figuur weergeven bekommen we de volgende afbeelding:



Figuur 6.6: Voorstelling eivormig haalbaarheidgebied van het multimodaal type één (via terminal T2) ten opzichte van type twee (via terminal V2). B is de eindbestemming van het transport. Indien B in het eivormig transport ligt, dan is het transport via het multimodaal type één voordeliger dan type twee. Indien B niet in het eivormig gebied ligt, dan is het multimodaal type twee voordeliger.

Met behulp van de parameters en de vergelijkingen van de eivormige figuur, kan men voor iedere situatie de breakeven figuur construeren. Wanneer eindbestemming B zich in het eivormige gebied bevindt, kunnen we concluderen dat, uitgaande van de stelling $C_{T2B} \neq C_{V2B}$, het voordeliger is om goederen te transporteren via het multimodaal type één dan type twee. In bovenstaande figuur ligt B niet in het eivormig gebied en zal het multimodaal type twee voordeliger zijn.

6.3 : Simultane weergave van meer dan twee transportalternatieven

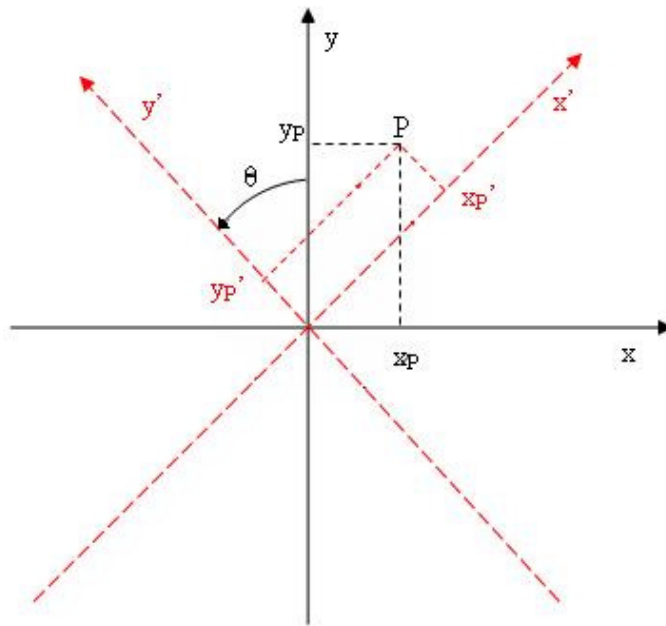
6.3.1 : Inleiding

Zoals reeds vermeld, hebben we in de vorige hoofdstukken verondersteld dat de transportgebruiker een keuze diende te maken uit twee vervoersalternatieven, namelijk rechtstreeks wegvervoer of multimodaal vervoer. De haalbaarheidmodellen die we tot hier toe ontwikkeld hebben, weerspiegelen deze dualiteit. Ze zijn slechts in staat om twee alternatieven per beurt te vergelijken met elkaar. In de meeste gevallen echter heeft de transportgebruiker meer dan twee transportalternatieven. Indien we onze haalbaarheidsmodellen als mogelijke beleidsinstrumenten willen promoten, is het van primordiaal belang dat ze alle relevante transportalternatieven simultaan met elkaar kunnen vergelijken. Vandaar dat we in deze paragraaf een methodologie ontwikkelen om meerdere alternatieven te vergelijken met elkaar.

6.3.2 : Algemeen

Zoals we reeds hierboven vermeld hebben, zijn de haalbaarheidsmodellen die we tot hier toe ontwikkeld hebben slechts instaat om twee alternatieven per keer te vergelijken met elkaar. Indien we twee alternatieven hebben volstaat één analyse. Wordt de vervoersgebruiker geconfronteerd met drie, vier, vijf of zes alternatieven, dan dienen we respectievelijk drie, zes, tien of vijftien analyses uit te voeren. We dienen namelijk elk alternatief te analyseren in functie van elk ander alternatief. Het probleem echter is dat de grafische weergave van elke analyse een andere assenstelsel heeft. We dienen een methode te ontwikkelen om deze verschillende assenstelsels te verankeren aan elkaar. We gaan gebruik maken van het principe van assentransformaties. Hierbij kiezen we eerst een achtergrond assenstelsel waaraan de grafische weergaven van elke analyse kan worden verankerd. Dit achtergrond assenstelsel komt overeen met het assenstelsel van één grafische weergave, welke willekeurig gekozen kan worden. In dit onderdeel leggen we het principe van assentransformaties uit.

Er zijn twee algemene types van assentransformaties welke voor ons relevant zijn. We hebben enerzijds de draaiing en anderzijds de verschuiving. Figuur 6.7 onderaan geeft een draaitransformatie weer over een hoek θ . In figuur 6.8 zien we een verschuivingstransformatie van de oorsprong naar het punt $(\alpha; \beta)$.



Figuur 6.7: Draaitransformatie over een hoek van θ . Het oorspronkelijk assenstelsel $(x;y)$ wordt gedraaid over een hoek van θ . Aldus bekomt men het nieuwe assenstelsel $(x';y')$. Het punt P heeft andere coördinaten voor de twee assenstelsel, namelijk $(x_p;y_p)$ en $(x'_p;y'_p)$ voor respectievelijk het oorspronkelijk en het nieuw assenstelsel. Naar het voorbeeld van F. Lemeire.

In bovenstaande figuur zien we een draaitransformatie over een hoek van θ . Hierbij wordt het oorspronkelijk assenstelsel $(x;y)$ gedraaid over een hoek van θ . Aldus bekomt men het getransformeerde assenstelsel $(x';y')$. Het oorspronkelijke assenstelsel gebruiken we hier als achtergrond assenstelsel. Het punt P heeft voor elk assenstelsel andere coördinaten, namelijk $(x_p;y_p)$ voor het oorspronkelijk assenstelsel en $(x'_p;y'_p)$ voor het getransformeerde assenstelsel. Het is mogelijk om de twee coördinaten van hetzelfde punt te relateren aan elkaar. We verkrijgen de volgende algemene uitdrukking:

$$\begin{aligned}x_p &= x'_p \cos \theta - y'_p \sin \theta \\y_p &= x'_p \sin \theta + y'_p \cos \theta\end{aligned}$$

We kunnen deze twee laatste vergelijkingen ook weergeven in matrix vorm.

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x'_p \\ y'_p \end{bmatrix}$$

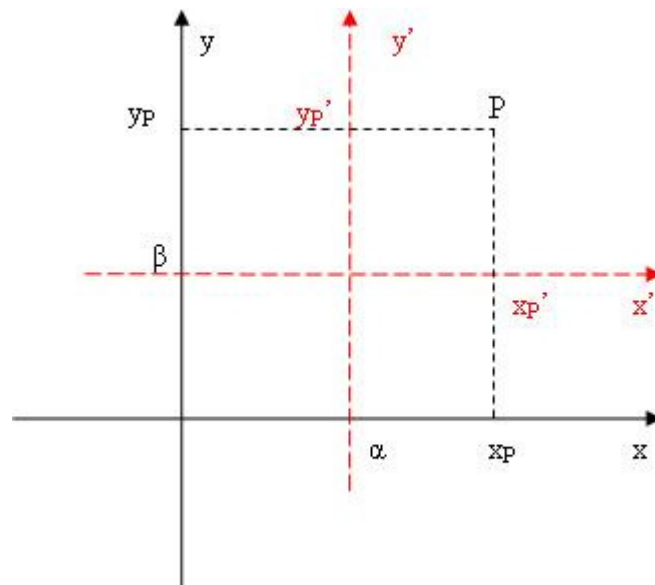
Uiteraard kunnen we de relatie ook omkeren, namelijk $(x';y')$ uitdrukken in functie van $(x;y)$. De draaiinghoek wordt dan gedefinieerd als $-\theta$. Aangezien $\cos(-\theta) = \cos \theta$ en $\sin(-\theta) = -\sin \theta$, kunnen we de omgekeerde relatie als volgt weergeven:

$$\begin{aligned}x_p' &= x_p \cos \theta + y_p \sin \theta \\y_p' &= -x_p \sin \theta + y_p \cos \theta\end{aligned}$$

In de onderstaande figuur geven we een verschuivingstransformatie weer. Hierbij wordt het oorspronkelijk, achtergrond, assenstelsel verschoven van de oorsprong naar de coördinaten $(\alpha;\beta)$. Aldus verkrijgen we het getransformeerde assenstelsel $(x';y')$. In tegenstelling tot figuur 6.7, zal er in dit geval geen draaiing aanwezig zijn. Het punt P heeft voor elk assenstelsel andere coördinaten, namelijk $(x_p;y_p)$ voor het oorspronkelijk assenstelsel en $(x_p';y_p')$ voor het getransformeerde assenstelsel. Net zoals bij de draaitransformatie, is het mogelijk om de twee coördinaten van hetzelfde punt te relateren aan elkaar. We verkrijgen de volgende algemene uitdrukking:

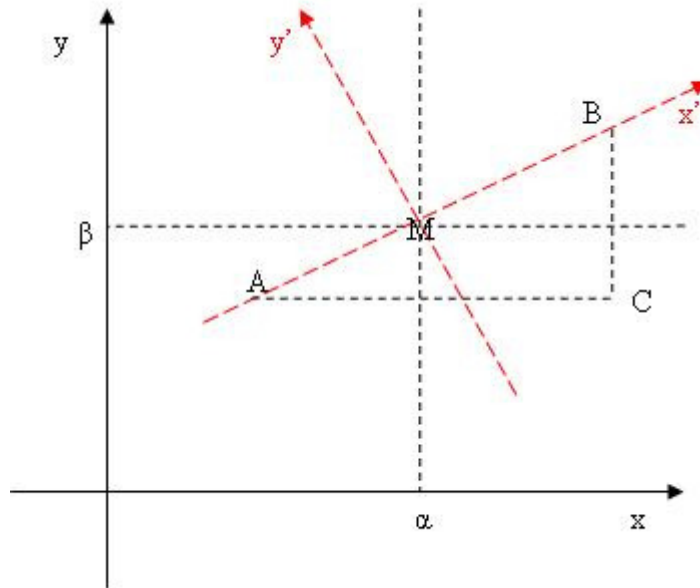
$$\begin{aligned}x_p &= \alpha + x_p' \\y_p &= \beta + y_p'\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}x_p' &= x_p - \alpha \\y_p' &= y_p - \beta\end{aligned}$$



Figuur 6.8: Verschuivingstransformatie van de oorsprong naar $(\alpha;\beta)$. Het oorspronkelijk assenstelsel $(x;y)$ wordt verschoven van de oorsprong naar $(\alpha;\beta)$. Aldus bekomt men het nieuwe assenstelsel $(x';y')$. Het punt P heeft andere coördinaten voor de twee assenstelsel, namelijk $(x_p;y_p)$ en $(x_p';y_p')$ voor respectievelijk het oorspronkelijk en het nieuw assenstelsel.

Uiteraard zullen we bij het gelijktijdig analyseren van meerdere alternatieven geconfronteerd worden met combinaties van draai- en verschuivingstransformaties. De onderstaande figuur schetst een dergelijke situatie. We veronderstellen hierbij dat het punt M in het midden ligt van het lijnstuk AB.



Figuur 6.9: Draai- en verschuivingstransformatie met een hoek van θ en van de oorsprong naar $(\alpha; \beta)$. Het oorspronkelijk assenstelsel $(x; y)$ wordt gedraaid over een hoek van θ en verschoven van de oorsprong naar $(\alpha; \beta)$. Aldus bekomt men het nieuwe assenstelsel $(x'; y')$. Naar het voorbeeld van F. Lemeire.

Indien we in bovenstaande figuur een willekeurig punt P zouden tekenen, dan zouden de coördinaten hiervan in het achtergrondstelsel op de volgende wijze kunnen gerelateerd worden met de coördinaten van het getransformeerde assenstelsel:

$$\begin{aligned}x_p &= \alpha + x'_p \cos \theta - y'_p \sin \theta \\y_p &= \beta + x'_p \sin \theta + y'_p \cos \theta \\x'_p &= [-\alpha + x_p] \cos \theta + [-\beta + y_p] \sin \theta \\y'_p &= -[-\alpha + x_p] \sin \theta + [-\beta + y_p] \cos \theta\end{aligned}$$

De coördinaten van de oorsprong van het achtergrondstelsel in functie van het getransformeerde stelsel kunnen als volgt berekend worden:

$$\begin{aligned}x'_0 &= -\alpha \cos \theta - \beta \sin \theta \\y'_0 &= \alpha \sin \theta - \beta \cos \theta\end{aligned}$$

Indien we veronderstellen dat de x' -as doorheen de punten A en B loopt, het punt M in het midden ligt van het lijnstuk (A;B), en de y' -as de middelloodlijn op (A;B) is, dan kunnen we de volgende vereenvoudigingen toepassen:

$$\alpha = x_M = \frac{x_A + x_B}{2}$$
$$\beta = y_M = \frac{y_A + y_B}{2}$$
$$\tan \theta = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} = \psi$$

Als $x_B \geq x_A$ dan is de hoek waarover het assenstelsel gedraaid wordt gelijk aan

$$\theta = \text{Arc tan} \left[\frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \right].$$

Als $x_B < x_A$ dan is de transformatiedraaihoek gelijk aan $\theta = 180^\circ + \text{Arc tan} \left[\frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \right]$.

Om de transformaties te berekenen hebben we θ niet nodig. We kunnen $\cos \theta$ en $\sin \theta$ rechtstreeks berekenen uit de gegevens. We verkrijgen de volgende vergelijkingen.

$$\sin \theta = \frac{CB}{|AB|} = \frac{y_B - y_A}{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}}$$
$$\cos \theta = \frac{AC}{|AB|} = \frac{x_B - x_A}{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}}$$

In de bovenvermelde uitdrukkingen voor $\sin \theta$ en $\cos \theta$ delen we de teller en de noemer door de term $(x_B - x_A)$. Aldus verkrijgen we de volgende uitdrukkingen:

- Indien $x_B \geq x_A$ dan bekomen we :

$$\sin \theta = \frac{\frac{y_B - y_A}{x_B - x_A}}{\sqrt{1 + \left[\frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \right]^2}} = \frac{\psi}{\sqrt{1 + \psi^2}}$$

$$\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \right]^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \psi^2}}$$

$$\text{met } \psi = \left(\frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \right) = \tan \theta$$

- Indien $x_B < x_A$ dan bekomen we :

$$\sin \theta = -\frac{\frac{y_B - y_A}{x_B - x_A}}{\sqrt{1 + \left[\frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \right]^2}} = \frac{-\psi}{\sqrt{1 + \psi^2}}$$

$$\cos \theta = \frac{-1}{\sqrt{1 + \left[\frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \right]^2}} = \frac{-1}{\sqrt{1 + \psi^2}}$$

$$\text{met } \psi = \left(\frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \right) = \tan \theta$$

Indien we deze herschrijving toepassen op de transformatieformules, bekomen we de volgende uitdrukkingen.

$$x = \alpha \pm \frac{1}{\sqrt{1 + \psi^2}} (x' - \psi y') \quad (1)$$

$$y = \beta \pm \frac{1}{\sqrt{1 + \psi^2}} (\psi x' + y')$$

$$x' = \pm \frac{1}{\sqrt{1 + \psi^2}} [(x - \alpha) + \psi(y - \beta)] \quad (2)$$

$$y' = \pm \frac{1}{\sqrt{1 + \psi^2}} [-\psi(x - \alpha) + (y - \beta)]$$

Indien $x_B \geq x_A$ dan dienen we het positief teken te gebruiken bij de bovenvermelde formules. Indien $x_B < x_A$ dan gebruiken we het negatieve teken.

6.3.3 : Implementatie

De zojuist geformuleerde transformatieformules laten ons toe om meerdere alternatieven met elkaar te vergelijken. We beschrijven in deze paragraaf de te volgen procedure. Vooreerst dient de

beleidsbeslisser de verschillende alternatieven twee per twee te vergelijken en analyseren. Hierbij dient elk alternatief te worden vergeleken met elk ander mogelijk alternatief. Naarmate het aantal alternatieven toeneemt, stijgen de uit te voeren vergelijkingen meer dan recht evenredig. Bijvoorbeeld: Wordt de vervoersgebruiker geconfronteerd met drie, vier, vijf of zes alternatieven, dan dienen we respectievelijk drie, zes, tien of vijftien analyses uit te voeren. We kunnen de grafische resultaten van de verschillende analyses niet rechtstreeks met elkaar vergelijken. Dit komt doordat elke analyse zijn eigen assenstelsel heeft welke niet noodzakelijkerwijs moet overeenstemmen met de andere analyses. De x-as wordt namelijk gedefinieerd als de verbindinglijn tussen de laatst gebruikte terminal van alternatief één en de laatst gebruikte terminal van alternatief twee. De y-as is de middelloodlijn van deze verbindinglijn. Aangezien de meeste alternatieven verschillende eindterminals hebben, zullen de assenstelsels van de analyses meestal niet met elkaar overeenstemmen.

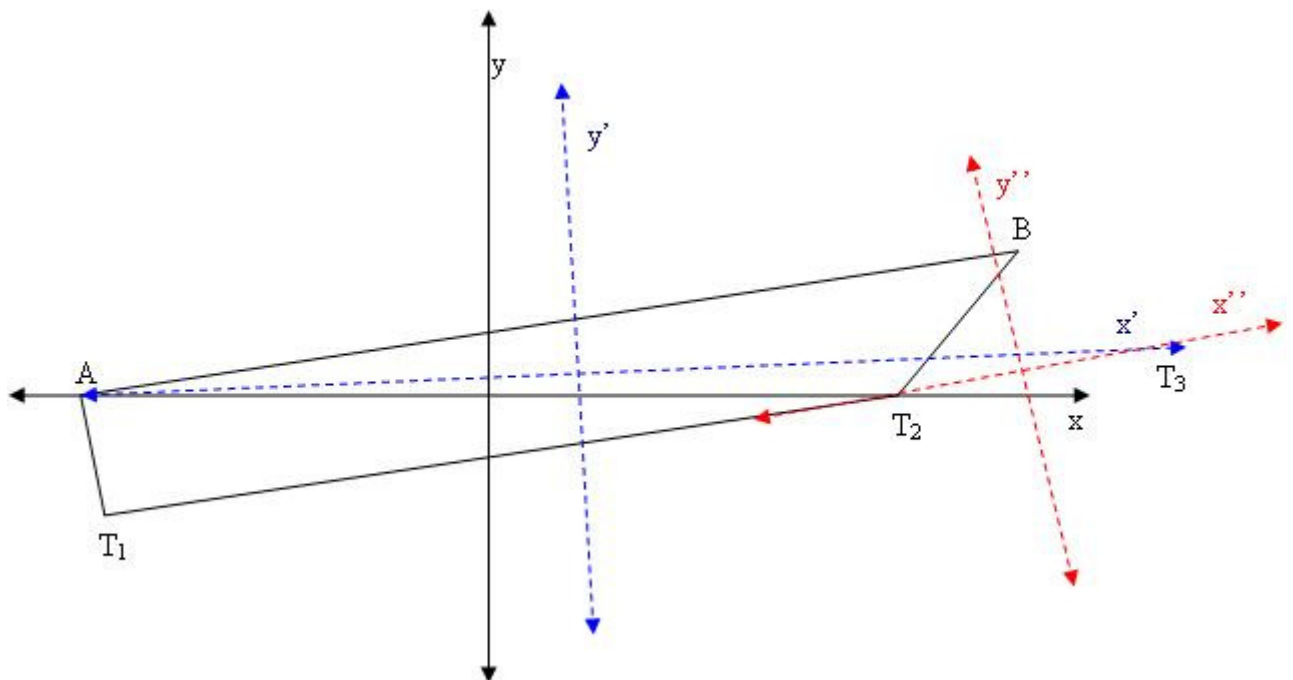
Indien we alle verschillende transportalternatieven tegelijk met elkaar willen vergelijken, dienen we de verschillende uitgevoerde analyses weer te geven in één assenstelsel. Dit assenstelsel noemen wij het achtergrondstelsel. Hoewel dit assenstelsel vrij gekozen kan worden, raden wij de gebruiker aan om een assenstelsel van één van de analyses te gebruiken. Zo spaart men één transformatie uit. We dienen vervolgens de vergelijkingen van elke analyse uit te drukken in de coördinaten van het achtergrondstelsel. Dit kunnen we realiseren door gebruik te maken van de transformatieformules van onderdeel 6.3.2. We veronderstellen dat het achtergrondstelsel gedefinieerd is in termen van $(x ; y)$ en het analyse assenstelsel in termen van $(x' ; y')$. De haalbaarheidsvergelijking van de analyse, is gedefinieerd in $(x' ; y')$. We dienen deze te transformeren zodat de vergelijking gedefinieerd wordt door $(x ; y)$. Dit betekent dat de variabelen x' en y' uitgedrukt moeten worden in termen van x en y . Dit doen we door gebruik te maken van vergelijking (2) in 6.3.2. We vervangen de x' en y' door deze uitdrukking. We verkrijgen aldus het haalbaarheidsgebied weergegeven in het achtergrond assenstelsel. Indien we deze procedure voor elke uitgevoerde analyse herhalen, bekomen we de gelijktijdige grafische vergelijking van de verschillende transportalternatieven.

Om deze methodiek verder te verduidelijken, zullen we in de volgende paragraaf de modelmatige analyse van de keuze van terminals, welke we besproken hebben in het onderdeel 6.2.1, en de vergelijking van twee verschillende types van multimodaal transport, onderdeel 6.2.2, opnieuw behandelen. We voegen er wel een derde transportalternatief bij, namelijk een bepaald type van unimodaal transport. We zullen illustreren hoe we de drie transportmogelijkheden gelijktijdig met elkaar kunnen afwegen.

6.4 : Directe vergelijking van drie alternatieven : uitbreiding combinaties type alternatieven

6.4.1 : Modelmatige analyse van de keuze van terminals bij het multimodaal transport

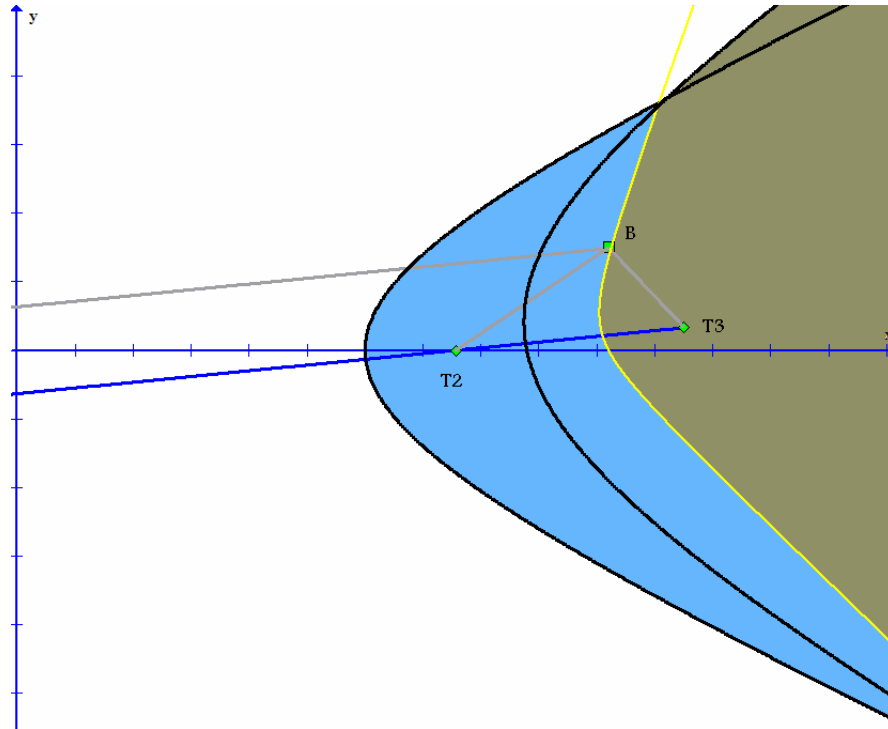
We veronderstellen dat een transportorganisatie de keuze heeft tussen een bepaalde vorm van unimodaal en multimodaal transport. Daarenboven kan de vervoergebruiker kiezen tussen twee verschillende eindterminals voor het multimodaal transport. Beleidsmatig dient hij dus te beslissen welke van de drie transporttrajecten hij wilt aanwenden. Hij dient dus deze drie alternatieven gelijktijdig te vergelijken met elkaar. Zoals reeds eerder vermeld, dienen we bij het vergelijken van drie alternatieven drie analyses uit te voeren, met name het unimodaal vs multimodaal type 1 , unimodaal vs multimodaal type 2 en multimodaal type 1 vs multimodaal type 2. We kiezen als achtergrondstelsel het assenstelsel overeenkomstig met de eerste analyse. De hierboven beschreven situatie wordt grafisch weergegeven in figuur 6.1. We dienen de haalbaarheidvergelijkingen van de analyse twee en drie te transformeren naar het achtergrondstelsel. De oriëntering van de assenstelsels van de drie analyses wordt in onderstaande figuur weergegeven. Het achtergrondstelsel is afgebeeld in het zwart, het assenstelsel van de tweede analyse is afgebeeld in het blauw en het assenstelsel van de derde analyse in het rood.



Figuur 6.10: Oriëntering van de assenstelsels bij de vergelijking van drie alternatieven. Het eerste alternatief is het unimodaal transport (AB), het tweede is het multimodaal traject ($A \rightarrow T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow B$), het derde alternatief is het multimodaal traject ($A \rightarrow T_1 \rightarrow T_3 \rightarrow B$). Het zwarte assenstelsel ($x; y$) komt overeen met de analyse van alternatief één met twee. Het blauwe assenstelsel ($x'; y'$) komt overeen met de analyse van alternatief één met drie. Het rode assenstelsel ($x''; y''$) komt overeen met de analyse van alternatief twee met drie.

Aangezien we reeds de haalbaarheidsformules afgeleid hebben voor elke type analyse, gaan we er hier niet terug op in. We dienen deze formules te transformeren zodat ze in functie zijn van de veranderlijken van het achtergrondstelsel. Aangezien de haalbaarheidsformule voor de eerste analyse

reeds geformuleerd is in termen van deze veranderlijken, dient deze laatste formule niet getransformeerd te worden. Voor deze transformatie maken we gebruik van de vergelijking (2) in onderdeel 6.3.2. Indien we de getransformeerde formules uitplotten in het achtergrondstelsel, krijgen we inzicht in de haalbaarheidsgebieden van alle transportalternatieven ten opzichte van elkaar. In onderstaande figuur geven we zulk resultaat weer.



Figuur 6.11 : Simultane vergelijking van drie transportalternatieven. Indien de eindbestemming B in het blauwe gebied ligt, dan zal het multimodaal transport ($A \rightarrow T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow B$) het voordeligste traject zijn. Indien de eindbestemming in het grijze gebied ligt, dan zal het multimodaal transport ($A \rightarrow T_1 \rightarrow T_3 \rightarrow B$) het voordeligste traject zijn. Als de eindbestemming B niet in het blauwe nog in het grijze gebied ligt, dan zal het unimodaal transport het voordeligst zijn.

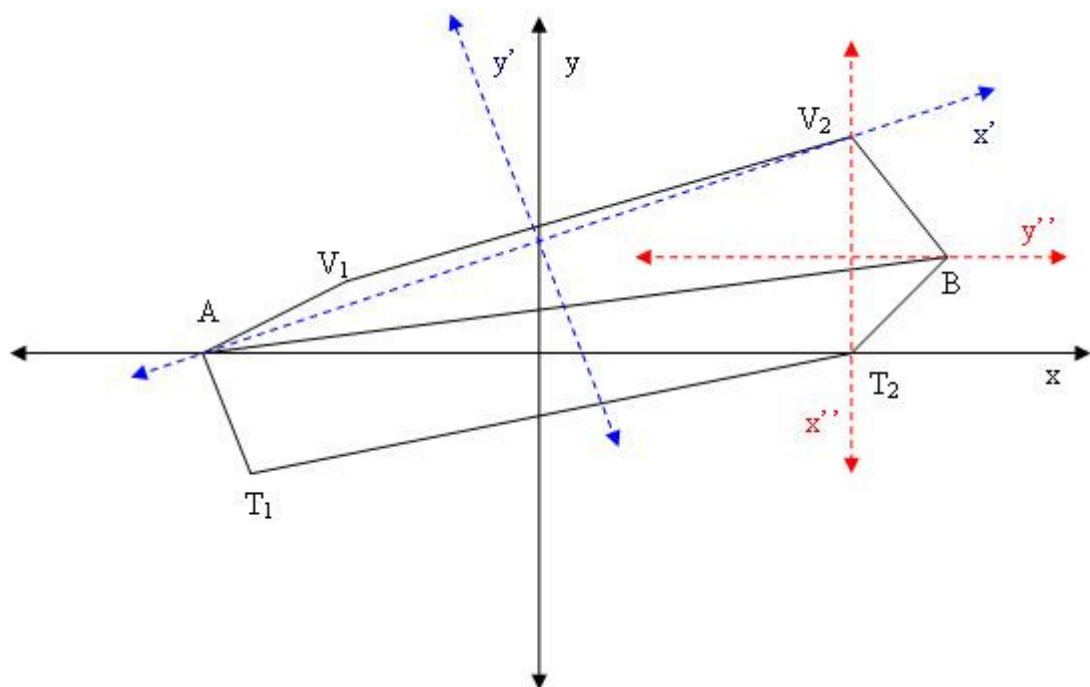
De eerste niet rechte lijnige curve van links is de weergave van de haalbaarheidsvergelijking van de eerste analyse, namelijk de afweging tussen het unimodaal en het multimodaal transport via terminal T_2 . De tweede niet rechte lijnige curve geeft het resultaat weer van de tweede analyse, namelijk de vergelijking tussen het unimodaal en het multimodaal transport via terminal T_3 . De gele curve geeft het resultaat weer van de laatste analyse, namelijk de afweging tussen het multimodaal transport via terminal T_2 en T_3 . Het gebied tussen de gele en de eerste curve, welke we in bovenstaande figuur met blauw hebben aangeduid, geeft het haalbaarheidsgebied weer van het multimodaal transport via terminal T_2 . Indien eindbestemming B zich hierin bevindt, wat in bovenstaande figuur het geval is, dan zal het multimodaal transport via de terminal T_2 het voordeligste transporttraject zijn. Het gebied rechts van de gele curve maar binnen de tweede curve, welke we in bovenstaande figuur met grijs hebben aangeduid, geeft het haalbaarheidsgebied weer van het multimodaal transport via terminal T_3 . Indien de eindbestemming, in dit geval eindbestemming B, zich hierin bevindt dan zal het multimodaal transport via de terminal T_3 het voordeligste transporttraject zijn. Indien de eindbestemming van het transport niet in het blauwe of grijze gebied ligt, dan zal het unimodaal transport het voordeligste zijn.

om de goederen te transporteren. Aangezien het punt B in bovenstaande figuur in het blauwe gebied ligt, zal het multimodaal transport via terminal T_2 het meest voordeligst zijn.

6.4.2 : Vergelijking twee verschillende types van multimodaal transport

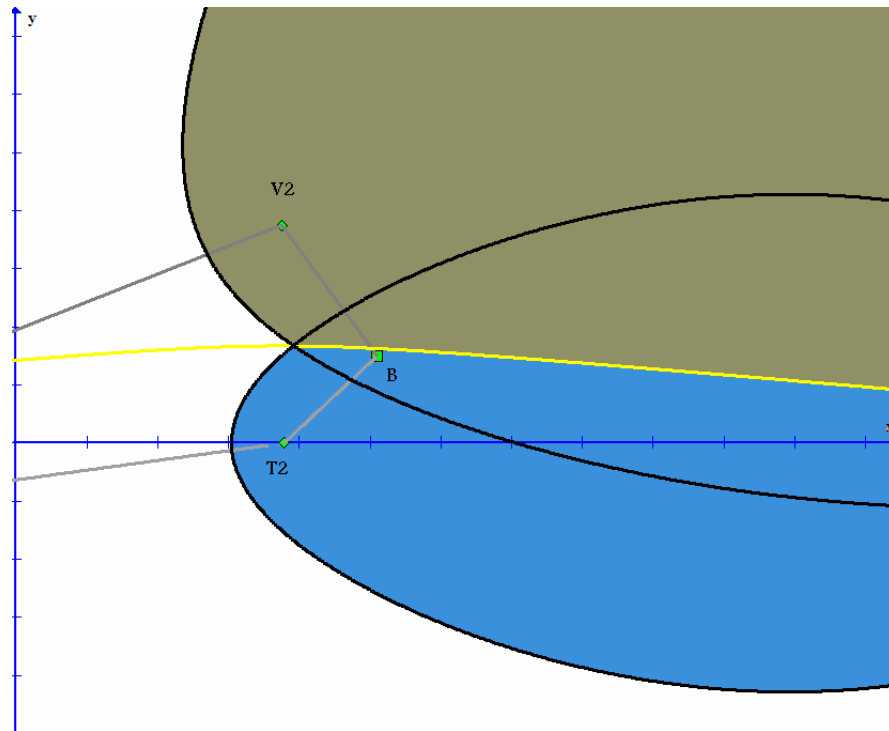
In dit onderdeel hernemen we de problematiek van 6.2.2. We voegen hier echter één bijkomend transportalternatief toe, namelijk een specifiek unimodaal traject. We verkrijgen, net zoals in de vorige paragraaf, drie transportalternatieven: het unimodaal, multimodaal type één en multimodaal type twee. De procedure die we dienen te volgen om deze drie alternatieven tegelijk te vergelijken met elkaar, komt overeen met 6.4.1. We dienen eerst drie aparte analyses uit te voeren. Aangezien deze methodiek reeds besproken is zowel in vorig als in dit hoofdstuk, gaan we hier niet uitgebreid verder op in.

We kiezen als achtergrondstelsel het assenstelsel overeenkomstig met de eerste analyse, namelijk het unimodaal vs multimodaal type één. We dienen de haalbaarheidvergelijkingen van de tweede analyse, te weten : multimodaal type twee vs unimodaal, en de derde analyse, te weten: multimodaal type één vs type twee, te transformeren naar het achtergrondstelsel. De oriëntering van de assenstelsels van de drie analyses wordt in onderstaande figuur weergegeven. Het achtergrondstelsel is afgebeeld in het zwart, het assenstelsel van de tweede analyse is afgebeeld in het blauw en het assenstelsel van de laatste analyse in het rood.



Figuur 6.12: Oriëntering van de assenstelsels bij de vergelijking van drie alternatieven. Het eerste alternatief is het unimodaal transport (AB), het tweede is het multimodaal traject ($A \rightarrow T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow B$), het derde alternatief is het multimodaal traject ($A \rightarrow V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow B$). Het zwarte assenstelsel ($x; y$) komt overeen met de analyse van alternatief één met twee. Het blauwe assenstelsel ($x'; y'$) komt overeen met de analyse van alternatief één met drie. Het rode assenstelsel ($x''; y''$) komt overeen met de analyse van alternatief twee met drie.

We dienen deze haalbaarheidsformules te transformeren zodat ze in functie zijn van de veranderlijken van het achtergrondstelsel. Aangezien de formule voor de eerste analyse reeds geformuleerd is in termen van deze veranderlijken, dienen we deze laatste niet te transformeren. We maken voor deze transformatie gebruik van de vergelijking (2). Indien we de getransformeerde formules uittekenen in het achtergrondstelsel, krijgen we een totaalbeeld van de haalbaarheidsgebieden van alle transportalternatieven ten opzichte van elkaar. Figuur 6.13 illustreert een dergelijke situatie.



Figuur 6.13 : Simultane vergelijking van drie transportalternatieven. Indien de eindbestemming B in het blauwe gebied ligt, dan zal het multimodaal transport ($A \rightarrow T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow B$) het voordeligste traject zijn. Indien de eindbestemming in het grijze gebied ligt, dan zal het multimodaal transport ($A \rightarrow V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow B$) het voordeligste traject zijn. Als de eindbestemming B niet in het blauwe nog in het grijze gebied ligt, dan zal het unimodaal transport het voordeligst zijn.

De onderste eivormige curve is de weergave van de haalbaarheidsvergelijking van de eerste analyse, namelijk de afweging tussen het unimodaal en het multimodaal transport via de terminals T_1 en T_2 . De bovenste eivormige curve geeft het resultaat weer van de tweede analyse, namelijk de vergelijking tussen het unimodaal en het multimodaal transport via de terminals V_1 en V_2 . De gele curve geeft het resultaat weer van de laatste analyse, namelijk de afweging tussen het multimodaal transport type één en twee. Het gebied onder de gele en binnen de eerste curve, welke we in bovenstaande figuur met blauw hebben aangeduid, geeft het haalbaarheidsgebied weer van het multimodaal transport via de terminals T_1 en T_2 . Indien eindbestemming B zich hierin bevindt, wat in bovenstaande figuur het geval is, dan zal het multimodaal transport via de terminals T_1 en T_2 het voordeligste transporttraject zijn. Het gebied boven de gele curve maar binnen de tweede curve, welke we in bovenstaande figuur met grijs hebben aangeduid, geeft het haalbaarheidsgebied weer van het multimodaal transport via de terminals V_1 en V_2 . Indien de eindbestemming, in dit geval eindbestemming B, zich hierin bevindt, dan

zal het multimodaal transport via de terminals V_1 en V_2 het voordeligste transporttraject zijn. Indien de eindbestemming van het transport niet in het blauwe of grijze gebied ligt, dan zal het unimodaal transport het voordeligste zijn om de goederen te transporteren. Aangezien het punt B in bovenstaande figuur in het blauwe gebied ligt, zal het multimodaal transport via de terminal T_1 en T_2 het meest voordeligst zijn.

6.5 : Directe vergelijking van meer dan drie alternatieven

In de vorige paragraaf hebben we drie transportalternatieven gelijktijdig met elkaar vergeleken. In de realiteit kan een transportgebruiker geconfronteerd worden met meer dan drie transporttrajecten. In dergelijke situaties is de bovenvermelde methodiek nog steeds geldig. Men dient eerst de verschillende alternatieven twee aan twee te vergelijken met elkaar. De resulterende haalbaarheidsformules dienen daarna getransformeerd te worden. Hierbij maken we gebruik van de vergelijking (2) in onderdeel 6.3.2. De getransformeerde formules kunnen dan geplot worden in het achtergrondstelsel. Aldus bekomt men de grafisch gelijktijdige vergelijking van de verschillende transportalternatieven. Aangezien de procedure voor het vergelijken van meer dan drie alternatieven overeenstemt met die van het vergelijken van drie alternatieven, gaan wij er hier niet meer verder op in. Voor een voorbeeld van een vergelijking van meer dan drie alternatieven verwijzen we de lezer naar het uitgewerkte voorbeeld in hoofdstuk 7.

Hoofdstuk 7 : Uitgewerkt voorbeeld

7.1 : Inleiding

In dit hoofdstuk gaan we de verschillende formules en methodes, die we ontwikkeld hebben in de vorige hoofdstukken, illustreren aan de hand van een uitgewerkt voorbeeld. De gegevens die hiertoe gebruikt worden zijn gebaseerd op realistische cijfers. In het voorbeeld veronderstellen we dat de vervoergebruiker de keuze heeft uit vier transportalternatieven, te weten het unimodaal wegtransport, de multimodale binnenvaart, het multimodaal spoortransport traject één en twee. We gaan eerst de haalbaarheidsgebieden berekenen van het economisch, sociaal-economisch, ecologisch en energetisch model. Hierbij dienen we zowel gebruik te maken van de hyperbolische en eivormige vergelijkingen als de transformatie formules. In het deel 7.7 en verder, gaan we na wat de invloed is van bepaalde wijzigingen op de verschillende haalbaarheidsgebieden. Zo onderzoeken we de impact van een stijging van de waarde van de te transporteren goederen, een tien procent daling van de overslagkosten van de multimodale binnenvaart, een integratie van tien procent van de externe kosten en een stijging van de gemiddelde snelheid van binnenschepen.

7.2 : Situatieschets

Onderneming A is gelegen op het 'parc industriel des Haut Sarts' te Luik. Deze onderneming dient maandelijks 1000 ton goederen, met een eenheidsprijs van € 750 per ton, te leveren aan onderneming B. Deze laatste is gelegen in de Dynamicalaan te Wilrijk. Onderneming A heeft de keuze uit vier transportalternatieven: het unimodaal wegtransport, de multimodale binnenvaart, het multimodaal spoortraject één en twee. De eindterminal van het multimodale binnenvaarttraject bevindt zich in de Belcrownlaan te Merksem. De eindterminal van het multimodale spoortraject één bevindt zich in de omgeving van de luchtbal te Antwerpen en van spoortraject twee in het Kielsbroek te Antwerpen. We veronderstellen dat de laadcapaciteit gelijk is aan 50 ton, 1000 ton en 500 ton voor respectievelijk een vrachtwagen, een binnenschip en een vrachtrein. Aangezien er een maandelijks vraag van 1000 ton aanwezig is, zal de leveringfrequentie voor het unimodaal wegtransport gelijk zijn aan één werkdag, één gehele werkmaand bij het multimodale binnenvaarttraject en twee werkweken bij het spoortransport. In de onderstaande tabellen geven we de lengtes van de verschillende trajectonderdelen weer.

Binnenvaart	
<i>Trajectonderdeel</i>	<i>Aantal kilometer</i>
Voortransport	5 kilometer
Hoofdtransport : <i>Albertkanaal</i>	130 kilometer
Natransport	13 kilometer
Totaal	148 kilometer

Tabel 7.1 : Weergave van de afstanden van de verschillende trajectonderdelen van de multimodale binnenvaart

Spoortransport via traject één (V2)	
<i>Trajectonderdeel</i>	<i>Aantal kilometer</i>
Voortransport	4 kilometer
Hoofdtransport	140 kilometer
Natransport	13 kilometer
Totaal	157 kilometer

Tabel 7.2 : Weergave van de afstanden van de verschillende trajectonderdelen van het multimodaal spoortransport via V2

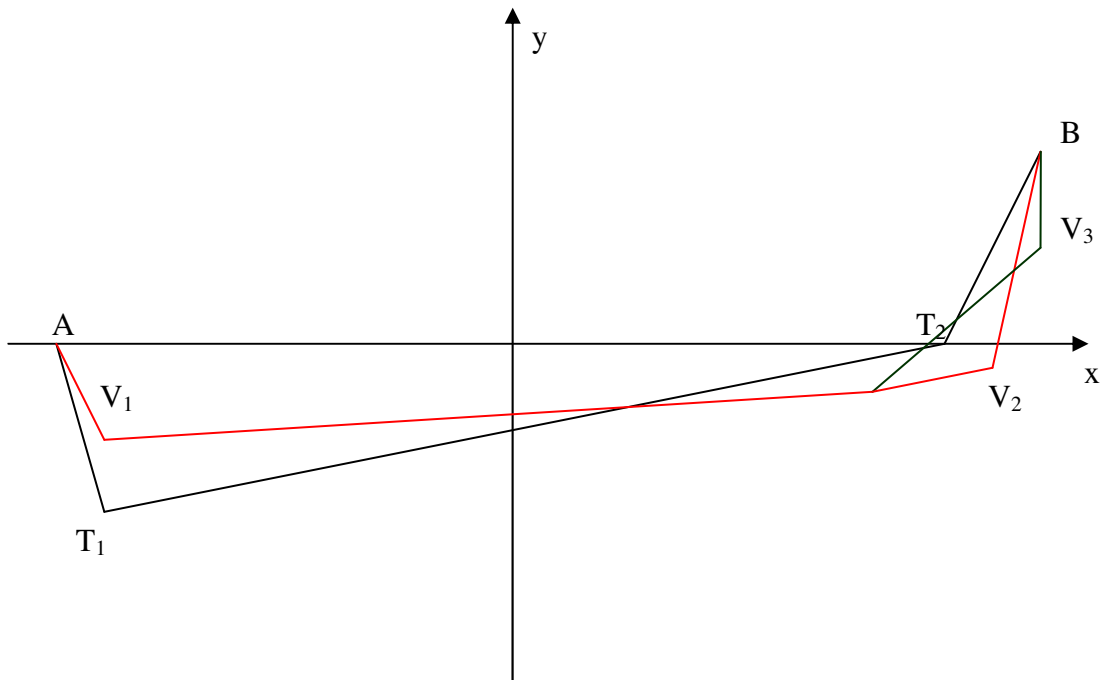
Spoortransport via traject twee (V3)	
<i>Trajectonderdeel</i>	<i>Aantal kilometer</i>
Voortransport	4 kilometer
Hoofdtransport	145 kilometer
Natransport	6 kilometer
Totaal	155 kilometer

Tabel 7.3 : Weergave van de afstanden van de verschillende trajectonderdelen van het multimodaal spoortransport via V3

Wegtransport	
<i>Trajectonderdeel</i>	<i>Aantal kilometer</i>
Totaal	140 kilometer

Tabel 7.4 : Weergave van de af te leggen afstand van het unimodaal wegtransport

We kunnen de verschillende transportalternatieven vereenvoudigt als volgt weergeven:



Figuur 7.1 : Vereenvoudigde weergave van de verschillende transportalternatieven. A is de transportgebruiker en B is de eindbestemming. Het multimodale binnenvaarttraject wordt in het zwart aangeduid: (A→T1→T2→B). Het multimodaal spoortransport traject één wordt in het rood aangeduid: (A→V1→V2→B). Het multimodaal spoortransport traject twee wordt gedeeltelijk in het rood en groen aangeduid: (A→V1→V3→B).

We kiezen als referentiekader het assenstelsel van de analyse unimodaal wegtransport vs het multimodale binnenvaarttraject. De x-as wordt dus gedefinieerd als het lijnstuk [A;T2] en de y-as als de middelloodlijn van dit lijnstuk. Dit referentiekader zal dienst doen als achtergrondstelsel bij de transformaties. In de onderstaande tabel worden de coördinaten weergegeven in functie van het referentiekader van de verschillende overslagpunten en de eindbestemming B.

Coördinaten van terminals en eindbestemming		
<i>Terminal</i>	<i>Coördinaat x-as</i>	<i>Coördinaat y-as</i>
A	-65.5	0
T1	-62.5	-4
T2	65.5	0
V1	-62.5	-1.43
V2	68	-1.5
V3	70	5.5
B	74	10

Tabel 7.5 : Weergave van de coördinaten van de terminals en eindbestemming in functie van het referentiekader.

Vooraleer we de haalbaarheidsgebieden voor de verschillende modellen kunnen gaan berekenen, dienen we eerst de kostenelementen te definiëren. We hebben gepoogd om deze kostenelementen zo realistisch mogelijk in te vullen.

- Waarde van de te transporteren goederen: € 750 per ton
- Gemiddelde snelheid wegvervoer = 45 km/uur
- Gemiddelde snelheid binnenvaart = 25 km/uur
- Gemiddelde snelheid voor- en natransport = 40km/uur
- Gemiddelde snelheid spoorvervoer = 30 km/uur
- Interne kost vrachtwagen = € 70 per ktonkm
- Interne kost voor- en natransport = € 75 per ktonkm
- Interne kost binnenvaart = € 30 per ktonkm
- Interne kost spoortransport = € 40 per ktonkm
- Verbruik aantal liter wegtransport = 0.05 liter per tonkm
- Verbruik aantal liter voor- natransport = 0.055 liter per tonkm
- Verbruik aantal liter binnenvaart = 0.01 liter per tonkm (bron atikel multi p 23)
- Verbruik aantal liter spoortransport = 0.015 liter per tonkm (diesel)
- Verbruik energie wegtransport = 0.3 kWh/tonkm
- Verbruik energie voor- en natransport = 0.31 kWh/tonkm
- Verbruik energie binnenvaart = 0.15 kWh/tonkm
- Verbruik energie spoortransport = 0.11 kWh/tonkm
- Verbruik energie overslag = 2.5 kWh/ton
- Externe kosten wegtransport = € 25 per ktonkm
- Externe kosten voor- en natransport = € 30 per ktonkm
- Externe kosten binnenvaart = € 4 per ktonkm
- Externe kosten spoortransport = € 12 per ktonkm
- Externe kosten van overslag = € 0.15 per ton
- Ecologische kost wegtransport = € 7 per ktonkm (bron atikel multi p 20)
- Ecologische kost voor- en natransport = € 7.5 per ktonkm
- Ecologische kost binnenvaart = € 2 per ktonkm (bron atikel multi p 24)
- Ecologische kost spoortransport = € 3.8 per ktonkm (bron atikel multi p 20) (diesel)
- Ecologische kost van overslag = € 0.1 per ton
- Totaal jaarlijkse vraag = 12.000 ton
- Bestelhoeveelheid wegtransport = 50 ton : elke werkdag één vrachtwagen
- Bestelhoeveelheid binnenvaart = 1.000 ton : één binnenschip elke maand
- Bestelhoeveelheid spoortransport = 500 ton : één trein om de twee werkweken
- Serviceniveau van 95% → $Z=1.65$
- Verpakkingskosten zijn dezelfde voor alle alternatieven dus niet relevant
- Orderbehandeling- en administratiekosten voor wegtransport = € 100 per verzending
- Orderbehandeling- en administratiekosten voor binnenvaart = € 400 per verzending
- Orderbehandeling- en administratiekosten voor spoortransport = € 300 per verzending
- Instelkosten niet belangrijk omdat één batch kleiner is dan 50 ton
- Goederenbehandelingskosten wegtransport = € 0.1 per ton
- Goederenbehandelingskosten voor- en natransport = € 0.1 per ton
- Overslagkosten binnenvaart = € 2 per ton

- Overslagkosten spoortransport =€ 1 per ton
- Kosten vestigingsplaats zijn voor alle alternatieven dezelfde, dus niet relevant.

7.3 : Economisch model

We geven hieronder onmiddellijk de totale kilometerafhankelijke en kilometeronafhankelijke kosten weer voor elk transportalternatief. We bekomen deze cijfers door de instructies in het onderdeel 2.11 van hoofdstuk twee te volgen. De concrete berekeningen kan men terugvinden in de bijgevoegde Excel-file 'Voorbeeld 1' op de CD-ROM.

Unimodaal wegtransport	
Kilometerafhankelijke kosten (C_{AB})	0,07013786
Kilometeronafhankelijke kosten (C_W)	1,178125
Multimodaal binnenvaarttraject	
Kilometerafhankelijk (C_{T2B})	0,074229873
Kilometeronafhankelijk (C_M)	8,361807671
Multimodaal spoortransport traject één	
Kilometerafhankelijk (C_{V2B})	0,075229873
Kilometeronafhankelijk (C_M)	8,408154452
Multimodaal spoortransport traject twee	
Kilometerafhankelijk (C_{V3B})	0,075262244
Kilometeronafhankelijk (C_M)	8,608983073

Tabel 7.6 : Weergave van de kilometerafhankelijke en kilometeronafhankelijke kosten van de vier transportalternatieven.

Aangezien we vier transportalternatieven gelijktijdig willen vergelijken met elkaar, is het noodzakelijk dat we zes analyses uitvoeren. Deze zijn het wegtransport vs het binnenvaarttraject, het wegtransport vs het spoortraject één, het wegtransport vs het spoortraject twee, het binnenvaarttraject vs het spoortraject één, het binnenvaarttraject vs het spoortraject twee en het spoortraject één vs het spoortraject twee. We geven hieronder de resultaten weer van deze zes analyses samen met de bijhorende transformatieformules. De concrete berekeningen kan men terugvinden in de bijgevoegde Excel-file 'Voorbeeld 1' op de CD-ROM.

7.3.1 : Unimodaal wegtransport vs multimodaal binnenvaarttraject

Haalbaarheidsformule	
$y^2 = 1542193,663 + 2312,72044x - (x^2 + 4290,5) - 214335,4202\sqrt{51,6053 + 0,154778x}$	
Beginpunt x_1	Eindpunt x_2
51,61617082	555,326556
Feasibility check	
$2C_{AB} \cdot x_A > C$	
9,188059614 > 7,183682671	

OK

We dienen bij deze analyse geen transformatie toe te passen aangezien het assenstelsel overeenstemt met het achtergrondstelsel.

7.3.2 : Unimodaal wegtransport vs multimodaal spoortransport traject één

Haalbaarheidsformule	
$y^2 = 1009261,19 + 1872,200302x - (x^2 + 4290,25) - 139250,8167\sqrt{52,273 + 0,193936x}$	
Beginpunt x_1	Eindpunt x_2
52,03050355	450,0296389
Feasibility check	
$2C_{AB}x_A > C$	
9,18806 > 7,230029452	
OK	

Aangezien de x-as bij deze analyse gedefinieerd wordt als het lijnstuk $[A, V_2]$ en de y-as als de middelloodlijn van dit lijnstuk, dienen we de formule te transformeren zodat de coördinaten in functie zijn van het achtergrondstelsel. In hoofdstuk zes bekwamen we de volgende transformatieformules voor het geval $x_B \geq x_A$:

$$x' = \frac{1}{\sqrt{1+\psi^2}} [(x-\alpha) + \psi(y-\beta)]$$

$$y' = \frac{1}{\sqrt{1+\psi^2}} [-\psi(x-\alpha) + (y-\beta)]$$

$$\text{met } \psi = \left(\frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \right) = \tan \theta$$

Waarbij $(x_A; y_A)$ overeenstemt met het punt A en $(x_B; y_B)$ met het punt V_2 . Daarenboven is $68 > -65,5$ dus bovenstaande formule mag gebruikt worden. We berekenen de transformatieformules als volgt:

$$\alpha = \left(\frac{x_{V2} - x_A}{2} \right) + x_A = \frac{68 + 65,5}{2} - 65,5 = 1,25$$

$$\beta = \left(\frac{y_A - y_{V2}}{2} \right) + y_{V2} = \frac{0 + 1,5}{2} - 1,5 = -0,75$$

$$\psi = \left(\frac{y_{V2} - y_A}{x_{V2} - x_A} \right) = \left(\frac{-1,5 + 0}{68 + 65,5} \right) = -0,011236$$

$$x' = 0,999937[(x - 1,25) - 0,01124(y + 0,75)]$$

$$y' = 0,999937[0,011236(x - 1,25) + (y + 0,75)]$$

Indien we deze uitdrukking substitueren voor x en y in de haalbaarheidsformule, dan bekomen wij het haalbaarheidsgebied van het spoortraject één ten opzichte van het wegtransport in functie van het achtergrondstelsel.

7.3.3 : Unimodaal wegtransport vs multimodaal spoortransport traject twee

Haalbaarheidsformule	
$y^2 = 1052697,533 + 1917,63467x - (x^2 + 4556,25) - 141314,1889\sqrt{55,21765 + 0,201173x}$	
Beginpunt x_1	Eindpunt x_2
53,48520272	465,1580891
Feasibility check	
$2C_{AB}x_A > C$	
$9,468611 > 7,430858073$	
OK	

Aangezien de x-as bij deze analyse gedefinieerd wordt als het lijnstuk $[A, V_3]$ en de y-as als de middelloodlijn van dit lijnstuk, dienen we de formule te transformeren zodat de coördinaten in functie zijn van het achtergrondstelsel. Aangezien $70 > -65,5$ zullen de transformatieformules de volgende zijn:

$$\alpha = \left(\frac{x_{V_3} - x_A}{2} \right) + x_A = \frac{70 + 65,5}{2} - 65,5 = 2,25$$

$$\beta = \left(\frac{y_A - y_{V_3}}{2} \right) + y_{V_3} = \frac{0 - 5,5}{2} + 5,5 = 2,75$$

$$\psi = \left(\frac{y_{V_3} - y_A}{x_{V_3} - x_A} \right) = \left(\frac{5,5 + 0}{70 + 65,5} \right) = 0,04059$$

$$x' = 0,999177[(x - 2,25) + 0,04059(y - 2,75)]$$

$$y' = 0,999177[-0,04059(x - 2,25) + (y - 2,75)]$$

Indien we deze uitdrukking substitueren voor x en y in de haalbaarheidsformule, dan bekomen wij het haalbaarheidsgebied van het spoortraject één ten opzichte van het wegtransport in functie van het achtergrondstelsel.

7.3.4 : Multimodaal binnenvaarttransport vs multimodaal spoortransport traject één

Haalbaarheidsformule	
$y^2 = 1074,06 + 224,19966x - (x^2 + 2,25) - 23172,35312\sqrt{0,002148 + 0,000897x}$	
Beginpunt x_1	Eindpunt x_2
0,320131555	177,8428388
Feasibility check	
$2C_{AB}x_A > C$	
$0,22269 > 0,046346781$	
OK	

Aangezien de x-as bij deze analyse gedefinieerd wordt als het lijnstuk $[T_2, V_2]$ en de y-as als de middelloodlijn van dit lijnstuk, dienen we de formule te transformeren zodat de coördinaten in functie zijn van het achtergrondstelsel. Aangezien $68 > 65,5$ zullen de transformatieformules de volgende zijn:

$$\alpha = \left(\frac{x_{V2} - x_{T2}}{2} \right) + x_{T2} = \frac{68 - 65,5}{2} + 65,5 = 66,75$$

$$\beta = \left(\frac{y_{T2} - y_{V2}}{2} \right) + y_{V2} = \frac{0 + 1,5}{2} - 1,5 = -0,75$$

$$\psi = \left(\frac{y_{V2} - y_{T2}}{x_{V2} - x_{T2}} \right) = \left(\frac{-1,5 + 0}{68 - 65,5} \right) = -0,6$$

$$x' = 0,857493[(x - 66,75) - 0,6(y + 0,75)]$$

$$y' = 0,857493[0,6(x - 66,75) + (y + 0,75)]$$

7.3.5 : Multimodaal binnenvaarttransport vs multimodaal spoortransport traject twee

Haalbaarheidsformule	
$y^2 = 28663,52925 + 506,841x - (x^2 + 12,25) - 115953,2672\sqrt{0,061096 + 0,002161x}$	
Beginpunt x_1	Eindpunt x_2
1,677604842	267,3912991
Feasibility check	
$2C_{AB}x_A > C$	
$0,519609 > 0,247175402$	
OK	

Aangezien de x-as bij deze analyse gedefinieerd wordt als het lijnstuk $[T_2, V_3]$ en de y-as als de middelloodlijn van dit lijnstuk, dienen we de formule te transformeren zodat de coördinaten in functie zijn van het achtergrondstelsel. Aangezien $70 > 65,5$ zullen de transformatieformules de volgende zijn:

$$\alpha = \left(\frac{x_{V3} - x_{T2}}{2} \right) + x_{T2} = \frac{70 - 65,5}{2} + 65,5 = 67,75$$

$$\beta = \left(\frac{y_{T2} - y_{V3}}{2} \right) + y_{V3} = \frac{0 - 5,5}{2} + 5,5 = 2,75$$

$$\psi = \left(\frac{y_{V3} - y_{T2}}{x_{V3} - x_{T2}} \right) = \left(\frac{5,5 + 0}{70 - 65,5} \right) = 1,22222$$

$$x' = 0,633238[(x - 67,75) + 1,22222(y - 2,75)]$$

$$y' = 0,633238[-1,22222(x - 67,75) + (y - 2,75)]$$

7.3.6 : Multimodaal spoortransport traject één vs spoortransport traject twee

Haalbaarheidsformule	
$y^2 = 19244664,59 + 16271,46x - (x^2 + 12,25) - 95826295,75\sqrt{0,040332 + 0,0000682x}$	
Beginpunt x_1	Eindpunt x_2
1,335232187	10067,47688
Feasibility check	
$2C_{AB}x_A > C$	
$0,526609 > 0,200828621$	
OK	

Aangezien de x-as bij deze analyse gedefinieerd wordt als het lijnstuk $[V_2, V_3]$ en de y-as als de middelloodlijn van dit lijnstuk, dienen we de formule te transformeren zodat de coördinaten in functie zijn van het achtergrondstelsel. Aangezien $70 > 68$ zullen de transformatieformules de volgende zijn:

$$\alpha = \left(\frac{x_{V3} - x_{V2}}{2} \right) + x_{V2} = \frac{70 - 68}{2} + 68 = 67,75$$

$$\beta = \left(\frac{y_{V2} - y_{V3}}{2} \right) + y_{V3} = \frac{-1,5 - 5,5}{2} + 5,5 = 2$$

$$\psi = \left(\frac{y_{V3} - y_{V2}}{x_{V3} - x_{V2}} \right) = \left(\frac{5,5 + 1,5}{70 - 68} \right) = 3,5$$

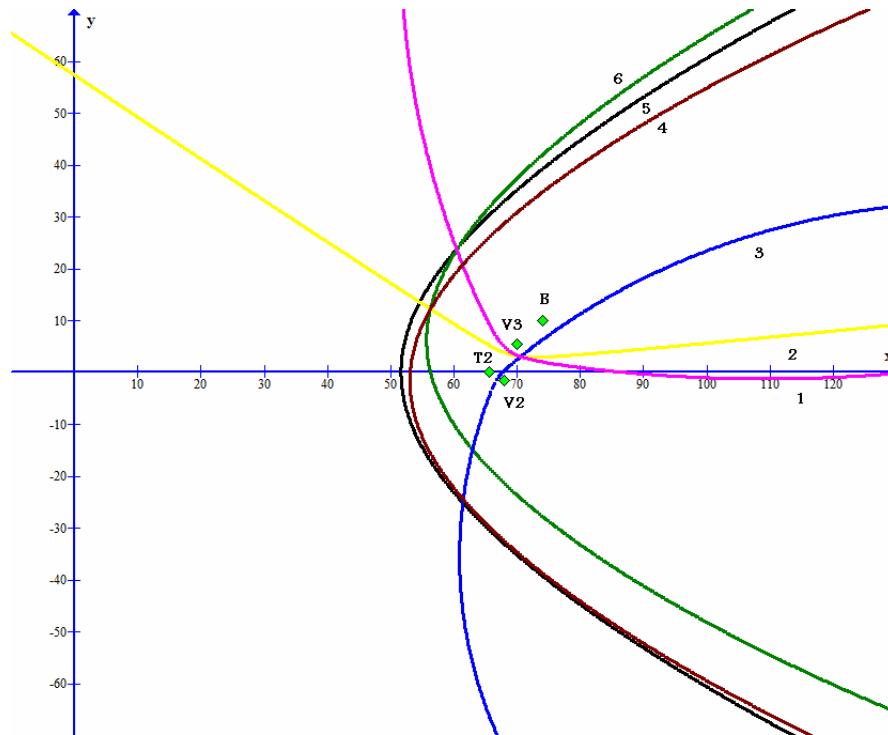
$$x' = 0,274721[(x - 69) + 3,5(y - 2)]$$

$$y' = 0,274721[-3,5(x - 69) + (y - 2)]$$

7.3.7 : Totale vergelijking

We beschikken nu over zes haalbaarheidsvergelijkingen. We kunnen het algemeen haalbaarheidsgebied voor elk transportalternatief afleiden door de verschillende vergelijkingen

gelijktijdig in één assenstelsel weer te geven. In onderstaande figuur doen we dit voor het economisch model.

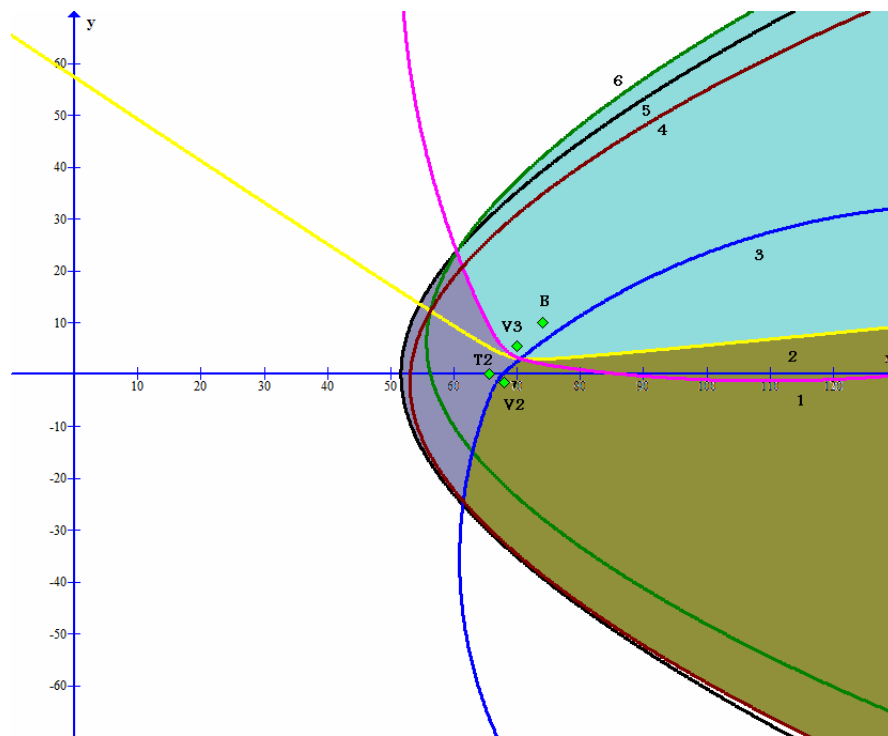


Figuur 7.2 : Voorstelling van de zes economische haalbaarheidscurven. B is de eindbestemming, T2, V2 en V3 zijn de eindterminals van respectievelijk het binnenvaarttraject, het spoortraject één en het spoortraject twee. Voor verdere informatie omtrent de identificatie en de interpretatie van de curven, verwijzen we naar de volgende twee alinea's onder deze figuur.

In de bovenstaande figuur worden de zes haalbaarheidfiguren afgebeeld. De figuur (1) (rooskleurig) geeft de afweging weer van het multimodale binnenvaarttraject met het spoortransport traject twee. In het gebied boven figuur (1) zal het spoortransport traject twee voordeliger zijn dan het binnenvaarttraject, onder figuur (2) zal het binnenvaarttraject voordeliger zijn. De figuur (2) (geelkleurig) geeft de afweging weer van het spoortransport traject één met het spoortransport traject twee. In het gebied boven de figuur (2) zal het spoortraject twee voordeliger zijn dan traject één, onder de figuur (2) zal het spoortraject één voordeliger zijn. De blauwkleurige figuur (3) geeft de afweging weer van het multimodale binnenvaarttraject met het spoortraject één. In het gebied onder figuur (3) zal het spoortransport traject één voordeliger zijn dan het binnenvaarttraject, boven figuur (3) zal het binnenvaarttraject voordeliger zijn. De roodkleurige figuur (4) geeft de afweging weer van het unimodaal wegtransport en het spoortransport traject één. In het gebied rechts van de figuur (in de figuur) (4) zal het spoortraject één voordeliger zijn dan het wegtransport, aan de linkerkant van de figuur zal het wegtransport voordeliger zijn. De zwartkleurige figuur (5) geeft de afweging weer van het unimodaal wegtransport met het multimodale binnenvaarttransport. In het gebied rechts van de figuur (in de figuur) (5) zal de binnenvaart voordeliger zijn dan het wegtransport, aan de linkerkant van de figuur zal het wegtransport voordeliger zijn. . De groenkleurige figuur (6) geeft de afweging weer van het unimodaal wegtransport en het spoortransport traject twee. In het gebied rechts van de

figuur (in de figuur) (6) zal het spoortraject twee voordeliger zijn dan het wegtransport, aan de linkerkant van de figuur zal het wegtransport voordeliger zijn.

Door gelijktijdig meerdere figuren te vergelijken met elkaar, kunnen we het algemeen haalbaarheidsgebied voor elk transportalternatief berekenen. We kunnen een algemeen haalbaarheidsgebied definiëren als het gebied waarbinnen de eindbestemming dient gelegen te zijn zodat het in overweging genomen transportalternatief het meest voordeligste is in termen van het model. We beschrijven hieronder de te volgen procedure. Het haalbaarheidsgebied van de binnenvaart gedefinieerd door drie figuren, namelijk (1), (3) en (5). Het haalbaarheidsgebied komt overeen met het gebied dat in de figuur (5) ligt en buiten de figuren (1) en (3). In figuur 7.3 wordt dit gebied weergegeven door een grijze kleur. Het haalbaarheidsgebied van het spoortransport traject één wordt ook door drie figuren gedefinieerd, namelijk (2), (3) en (4). Het haalbaarheidsgebied komt overeen met het gebied dat in de figuur (4) en (3) ligt en tegelijk onder de figuur (2). In figuur 7.3 wordt dit gebied weergegeven door een groene kleur. Het haalbaarheidsgebied van het spoortransport traject twee wordt door drie figuren gedefinieerd, namelijk (1), (2) en (6). Het haalbaarheidsgebied komt overeen met het gebied dat in de figuur (1), (2) en (6) ligt. In figuur 7.3 wordt dit gebied weergegeven door een blauwe kleur. Het resterende gebied komt overeen met het haalbaarheidsgebied van het unimodaal wegtransport.



Figuur 7.3 : Voorstelling van de zes economische haalbaarheidscurven en de daaruit volgende algemene haalbaarheidsgebieden voor de vier transportalternatieven. Indien eindbestemming B in het blauwe, groene, grijze of witte haalbaarheidsgebied ligt, dan zal de voordeligste economische transportwijze gelijk zijn aan respectievelijk het tweede spoortraject, het eerste spoortraject, het binnenvaartraject of het unimodaal wegtransport.

Uit bovenstaande figuur kunnen we concluderen dat voor het voorbeeld het spoortransport via het tweede traject economisch voordeliger is dan de drie andere alternatieven. We kunnen dit afleiden uit de positie van de eindbestemming B. Deze ligt namelijk in het (blauwe) algemeen haalbaarheidsgebied van het spoortransport via terminal V_3 . Indien de eindbestemming B gelegen zou zijn in het grijze gebied, dan zou de binnenvaart het voordeligste transportalternatief zijn in termen van het economisch model. In *bijlage 3* hebben we de bovenstaande figuur geprojecteerd op een landkaart van de regio Antwerpen. Uit deze figuur kunnen we duidelijk afleiden dat voor de geconsidereerde transportnoodzaak de regio Antwerpen opgedeeld wordt in vier aparte haalbaarheidsgebieden. In de volgende paragraaf gaan we de algemene haalbaarheidsgebieden opnieuw berekenen voor de vier alternatieven maar dan in termen van het sociaal-economisch model.

7.4 : Sociaal-economisch model

We geven hieronder, net zoals in de vorige paragraaf, de totale kilometerafhankelijke en kilometeronafhankelijke kosten weer voor elk transportalternatief. We bekomen deze cijfers door de instructies in het onderdeel 2.11 van hoofdstuk twee te volgen. De noodzakelijke berekeningen om tot deze cijfers te komen, kan men terugvinden in de bijgevoegde Excel-file 'Voorbeeld 1' op de CD-ROM.

Unimodaal wegtransport	
Kilometerafhankelijke kosten (C_{AB})	0,09513786
Kilometeronafhankelijke kosten (C_W)	1,178125
Multimodaal binnenvaarttraject	
Kilometerafhankelijk (C_{T2B})	0,104229873
Kilometeronafhankelijk (C_M)	9,031807671
Multimodaal spoortransport traject één	
Kilometerafhankelijk (C_{V2B})	0,105229873
Kilometeronafhankelijk (C_M)	10,20815445
Multimodaal spoortransport traject twee	
Kilometerafhankelijk (C_{V3B})	0,105297918
Kilometeronafhankelijk (C_M)	10,46898307

Tabel 7.7 : Weergave van de kilometerafhankelijke en kilometeronafhankelijke kosten van de vier transportalternatieven.

Aangezien we vier transportalternatieven gelijktijdig willen vergelijken met elkaar, is het noodzakelijk dat we zes analyses uitvoeren. Deze zijn het wegtransport vs het binnenvaarttraject, het wegtransport vs het spoortraject één, het wegtransport vs het spoortraject twee, het binnenvaarttraject vs het spoortraject één, het binnenvaarttraject vs het spoortraject twee en het spoortraject één vs het spoortraject twee. We geven hieronder de resultaten weer van deze zes analyses samen met de bijhorende transformatieformules. De concrete berekeningen kan men terugvinden in de bijgevoegde Excel-file 'Voorbeeld 1' op de CD-ROM.

7.4.1 : Unimodaal wegtransport vs multimodaal binnenvaarttraject

Haalbaarheidsformule	
$y^2 = 373851,25 + 1439,26x - (x^2 + 4290,25) - 47404,442\sqrt{61,68 + 0,474915x}$	
Beginpunt x_1	Eindpunt x_2
42,38002529	572,4698673
Feasibility check	
$2C_{AB}x_A > C$	
12,46306 > 7,853682671	
OK	

We dienen bij deze analyse geen transformatie toe te passen aangezien het assenstelsel overeenstemt met het achtergrondstelsel.

7.4.2 : Unimodaal wegtransport vs multimodaal spoortransport traject één

Haalbaarheidsformule	
$y^2 = 401322,01 + 1303,7487x - (x^2 + 4290,25) - 44218,12887\sqrt{81,54 + 0,529794x}$	
Beginpunt x_1	Eindpunt x_2
48,36635222	405,6729613
Feasibility check	
$2C_{AB}x_A > C$	
12,46306 > 9,030029452	
OK	

Aangezien de x-as bij deze analyse gedefinieerd wordt als het lijnstuk $[A, V_2]$ en de y-as als de middelloodlijn van dit lijnstuk, dienen we de formule te transformeren zodat de coördinaten in functie zijn van het achtergrondstelsel. Voor de transformatieformules verwijzen wij naar het onderdeel 7.3.2.

7.4.3 : Unimodaal wegtransport vs multimodaal spoortransport traject twee

Haalbaarheidsformule	
$y^2 = 419183,09 + 1335,049x - (x^2 + 4556,25) - 44886,538\sqrt{86,32 + 0,54984x}$	
Beginpunt x_1	Eindpunt x_2
49,77485618	417,1784119
Feasibility check	
$2C_{AB}x_A > C$	
12,84361 > 9,290858073	
OK	

Aangezien de x-as bij deze analyse gedefinieerd wordt als het lijnstuk $[A, V_3]$ en de y-as als de middelloodlijn van dit lijnstuk, dienen we de formule te transformeren zodat de coördinaten in functie zijn van het achtergrondstelsel. Voor de transformatieformules verwijzen wij naar het onderdeel 7.3.3.

7.4.4 : Multimodaal binnenvaarttransport vs multimodaal spoortransport traject één

Haalbaarheidsformule	
$y^2 = 691911,645 + 314,19678x - (x^2 + 2,25) - 588159,9844\sqrt{1,384 + 0,001257x}$	
Beginpunt x_1	Eindpunt x_2
5,623260795	geen
Feasibility check	
$2C_{AB}x_A > C$	
0,31269 < 1,176346781	
NIET OK	

Aangezien we een negatieve 'feasibility test' uitkomen, is het niet mogelijk om de eivormige haalbaarheidsfiguur te bekomen. Concreet betekent dit dat in geen enkel grafisch punt het spoortransport via het traject één voordeliger is dan het binnenvaarttransport.

7.4.5 : Multimodaal binnenvaarttransport vs multimodaal spoortransport traject twee

Haalbaarheidsformule	
$y^2 = 905361,81 + 686,644x - (x^2 + 12,25) - 629926,425\sqrt{2,06547 + 0,003133x}$	
Beginpunt x_1	Eindpunt x_2
6,876956753	geen
Feasibility check	
$2C_{AB}x_A > C$	
0,729609 < 1,437175402	
NIET OK	

Aangezien we een negatieve 'feasibility test' uitkomen, is het niet mogelijk om de eivormige haalbaarheidfiguur te bekomen. Concreet betekent dit dat in geen enkel grafisch punt het spoortransport via het traject twee voordeliger is dan het binnenvaarttransport.

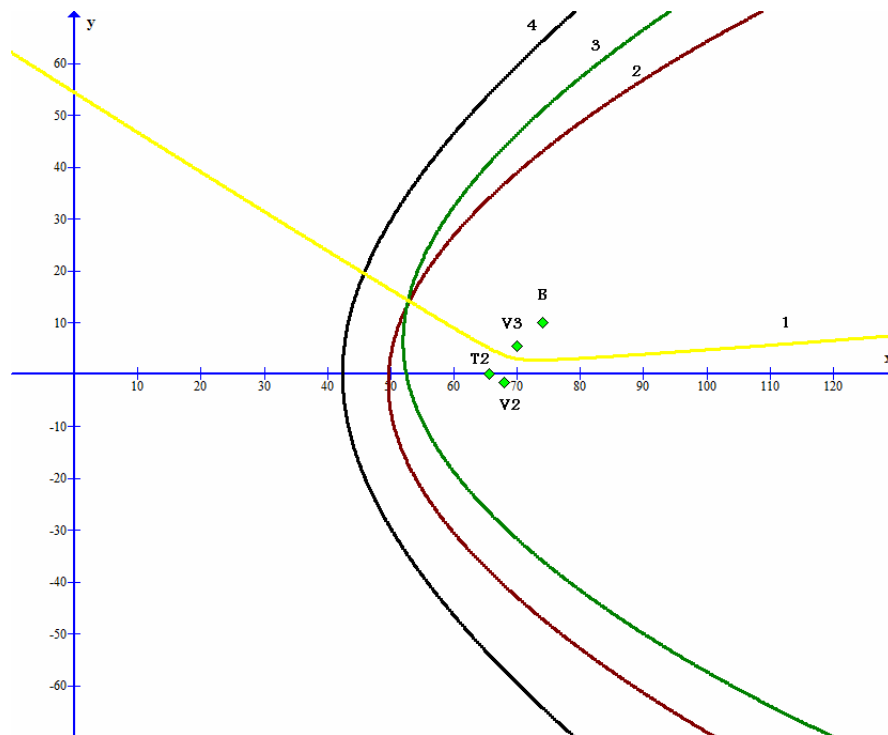
7.4.6 : Multimodaal spoortransport traject één vs spoortransport traject twee

Haalbaarheidsformule	
$y^2 = 7346744,215 + 10828,91x - (x^2 + 12,25) - 28166934,51\sqrt{0,068 + 0,000201x}$	
Beginpunt x_1	Eindpunt x_2
1,240058498	6995,699665
Feasibility check	
$2C_{AB}x_A > C$	
0,736609 > 0,260828621	
OK	

Aangezien de x-as bij deze analyse gedefinieerd wordt als het lijnstuk $[V_2, V_3]$ en de y-as als de middelloodlijn van dit lijnstuk, dienen we de formule te transformeren zodat de coördinaten in functie zijn van het achtergrondstelsel. Voor de transformatieformules verwijzen wij naar het onderdeel 7.3.6.

7.4.7 : Totale vergelijking

We beschikken nu over vier haalbaarheidsformules. Aangezien zij allen in functie zijn van het achtergrondstelsel, kunnen we de algemene haalbaarheidsgebieden weergeven door de vier haalbaarheidsfiguren tegelijk weer te geven in éénzelfde assenstelsel. In onderstaande figuur doen we dit voor het sociaal-economisch model:

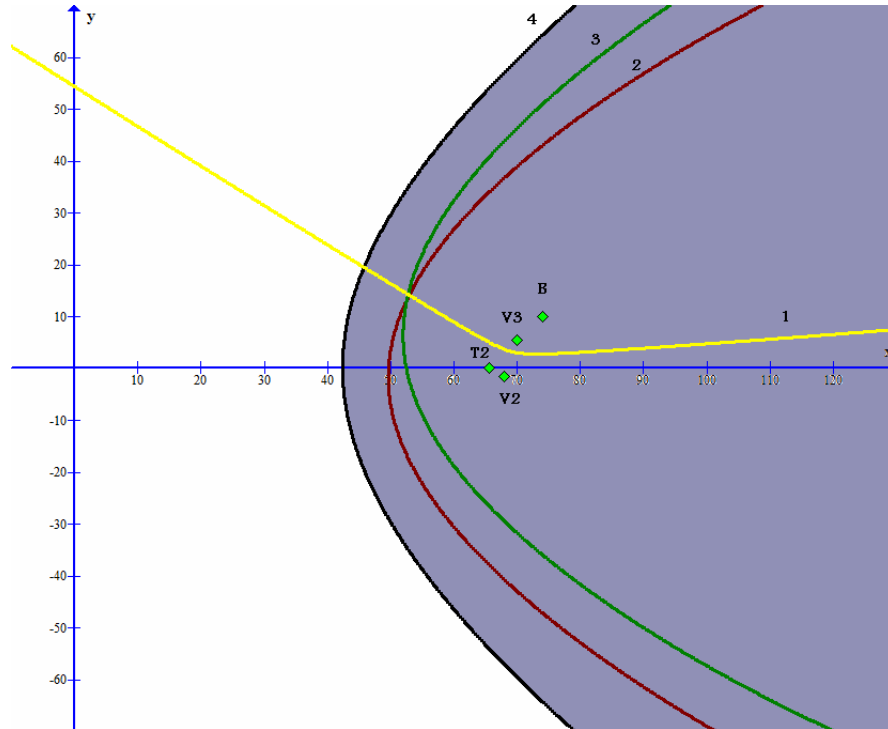


Figuur 7.4 : Voorstelling van de vier sociaal-economische haalbaarheidscurven. B is de eindbestemming, T2, V2 en V3 zijn de eindterminals van respectievelijk het binnenvaarttraject, het spoortraject één en het spoortraject twee. Voor verdere informatie omtrent de identificatie en de interpretatie van de curven, verwijzen we naar de volgende twee alinea's onder deze figuur

In de bovenstaande figuur worden de vier haalbaarheidsfiguren afgebeeld. De gele figuur (1) geeft de afweging weer van het spoortransport traject één met het spoortransport traject twee. Het gebied in de figuur geeft de plaatsen weer waar het spoortraject twee voordeliger is dan traject één. De roodkleurige figuur (2) geeft de afweging weer van het unimodaal wegtransport en het spoortransport traject één. In het gebied rechts van de figuur zal het spoortraject één voordeliger zijn dan het wegtransport, aan de linkerkant van de figuur zal het wegtransport voordeliger zijn. De groenkleurige figuur (3) geeft de afweging weer van het unimodaal wegtransport en het spoortransport traject twee. In het gebied rechts van de figuur zal het spoortraject twee voordeliger zijn dan het wegtransport, aan de linkerkant van de figuur zal het wegtransport voordeliger zijn. De zwartkleurige figuur (4) geeft de afweging weer van het unimodaal wegtransport met het multimodale binnenvaarttransport. In het gebied rechts van de figuur zal de binnenvaart voordeliger zijn dan het wegtransport, aan de linkerkant van de figuur zal het wegtransport voordeliger zijn.

Ook hier kunnen we de algemene haalbaarheidsgebieden van de verschillende transportgebieden afleiden, door meerdere figuren tegelijk te analyseren. In het onderdeel 7.4.4 en 7.4.5 zijn we tot de conclusie gekomen dat zowel het spoortraject één als twee nooit sociaal-economisch voordeliger is

dan het binnenvaarttransport. Aangezien het mogelijk haalbaarheidsgebied van beide alternatieven, welke gedefinieerd wordt als het totale gebied waar het alternatief voordeliger is dan het wegtransport, kleiner zijn dan dat van het binnenvaarttransport, zullen de beide spooralternatieven geen algemeen haalbaarheidsgebied hebben. Het totale gebied wordt met andere woorden onderverdeeld in twee delen: het gebied waar het binnenvaarttransport het voordeligst is en het gebied waar het unimodaal wegtransport het voordeligst is. De onderstaande figuur illustreert dit.



Figuur 7.5 : Voorstelling van de vier sociaal economische haalbaarheidscurven en de daaruit volgende algemene haalbaarheidsgebieden voor de vier transportalternatieven. Indien eindbestemming B in het blauwe haalbaarheidsgebied ligt, dan zal het binnenvaarttraject het voordeligste zijn in termen van het sociaal-economisch model. Indien het buiten het blauwe gebied ligt, zal het unimodaal wegtransport het voordeliger zijn.

Uit bovenstaande figuur kunnen we concluderen dat voor het voorbeeld het binnenvaarttransport sociaal-economisch voordeliger is dan de drie andere alternatieven. We kunnen dit afleiden uit de positie van de eindbestemming B. Deze ligt namelijk in het grijze algemeen haalbaarheidsgebied van het multimodale binnenvaartraject. In *bijlage 4* hebben we de bovenstaande figuur geprojecteerd op een landkaart van de regio Antwerpen. Uit deze figuur kunnen we duidelijk afleiden dat voor de geconsidereerde transportnoodzaak de regio Antwerpen opgedeeld wordt in twee haalbaarheidsgebieden.

7.5 : Ecologisch model

We geven hieronder, net zoals in de vorige paragraaf, de totale kilometerafhankelijke en kilometeronafhankelijke kosten weer voor elk transportalternatief. De noodzakelijke berekeningen om tot deze cijfers te komen, kan men terugvinden in de bijgevoegde Excel-file 'Voorbeeld 1' op de CD-ROM.

Unimodaal wegtransport	
Kilometerafhankelijke kosten (C_{AB})	0,007
Kilometeronafhankelijke kosten (C_W)	0
Multimodaal binnenvaarttraject	
Kilometerafhankelijk (C_{T2B})	0,008
Kilometeronafhankelijk (C_M)	0.539
Multimodaal spoortransport traject één	
Kilometerafhankelijk (C_{V2B})	0,0075
Kilometeronafhankelijk (C_M)	0.662
Multimodaal spoortransport traject twee	
Kilometerafhankelijk (C_{V3B})	0,0075
Kilometeronafhankelijk (C_M)	0.681

Tabel 7.8 : Weergave van de kilometerafhankelijke en kilometeronafhankelijke kosten van de vier transportalternatieven.

Aangezien we vier transportalternatieven gelijktijdig willen vergelijken met elkaar, is het noodzakelijk dat we zes analyses uitvoeren. Deze zijn het wegtransport vs het binnenvaarttraject, het wegtransport vs het spoortraject één, het wegtransport vs het spoortraject twee, het binnenvaarttraject vs het spoortraject één, het binnenvaarttraject vs het spoortraject twee en het spoortraject één vs het spoortraject twee. We geven hieronder de resultaten weer van deze zes analyses samen met de bijhorende transformatieformules. De concrete berekeningen kan men terugvinden in de bijgevoegde Excel-file 'Voorbeeld 1' op de CD-ROM.

7.5.1 : Unimodaal wegtransport vs multimodaal binnenvaarttraject

Haalbaarheidsformule	
$y^2 = 145906,1 + 986,86667x - (x^2 + 4290,25) - 268302,22\sqrt{0,290521 + 0,00393x}$	
Beginpunt x_1 40,3	Eindpunt x_2 443,5
Feasibility check	
$2C_{AB}x_A > C$	
0,917 > 0,539	
OK	

We dienen bij deze analyse geen transformatie toe te passen aangezien het assenstelsel overeenstemt met het achtergrondstelsel.

7.5.2 : Unimodaal wegtransport vs multimodaal spoortransport traject één

Haalbaarheidsformule	
$y^2 = 877530,1974 + 1901,759x - (x^2 + 4290,25) - 1322425,68\sqrt{0,438244 + 0,0019x}$	
Beginpunt x_1	Eindpunt x_2
47,9137931	575,5
Feasibility check	
$2C_{AB}x_A > C$	
0,917 > 0,662	
OK	

Voor de transformatieformules verwijzen wij naar het onderdeel 7.3.2.

7.5.3 : Unimodaal wegtransport vs multimodaal spoortransport traject twee

Haalbaarheidsformule	
$y^2 = 928624,88 + 1959,8276x - (x^2 + 4556,25) - 1360380,5\sqrt{0,46376 + 0,001958x}$	
Beginpunt x_1	Eindpunt x_2
49,29310345	595,5
Feasibility check	
$2C_{AB}x_A > C$	
0,945 > 0,681	
OK	

Voor de transformatieformules verwijzen wij naar het onderdeel 7.3.3.

7.5.4 : Multimodaal binnenvaarttransport vs multimodaal spoortransport traject één

Haalbaarheidsformule	
$y^2 = 30289,486 + 45,5484x - (x^2 + 2,25) - 245744,02\sqrt{10,015129 - 0,000047x}$	
Beginpunt x_1	Eindpunt x_2
7,887096774	geen
Feasibility check	
$2C_{AB}x_A > C$	
0,024 < 0,123	
NIET OK	

Aangezien we een negatieve 'feasibility test' uitkomen, is het niet mogelijk om de eivormige haalbaarheidfiguur te bekomen. Concreet betekent dit dat in geen enkel grafisch punt het spoortransport via het traject één voordeliger is dan het binnenvaarttransport.

7.5.5 : Multimodaal binnenvaarttransport vs multimodaal spoortransport traject twee

Haalbaarheidsformule	
$y^2 = 40369,96462 - 108,6129x - (x^2 + 12,25) - 283704,475\sqrt{0,020164 - 0,00011x}$	
Beginpunt x_1	Eindpunt x_2
9,048387097	geen

Feasibility check
$2C_{AB}x_A > C$
$0,056 < 0,142$
NIET OK

Aangezien we een negatieve 'feasibility test' uitkomen, is het niet mogelijk om de eivormige haalbaarheidfiguur te bekomen. Concreet betekent dit dat in geen enkel grafisch punt het spoortransport via het traject twee voordeliger is dan het binnenvaarttransport.

7.5.6 : Multimodaal spoortransport traject één vs spoortransport traject twee

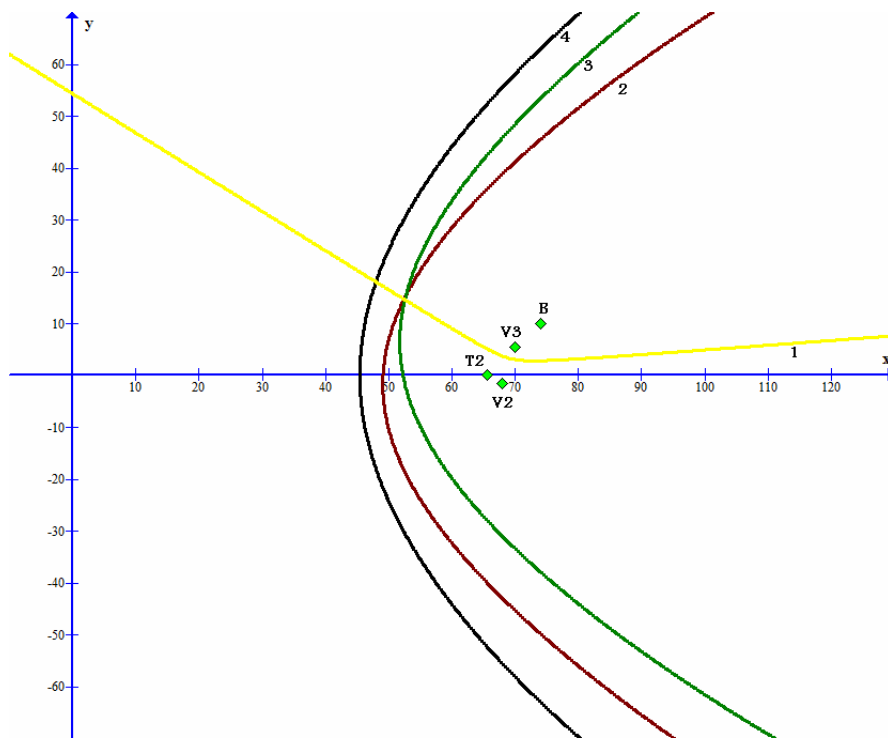
Aangezien de kilometerafhankelijke kosten voor beide alternatieven dezelfde zijn, dienen we gebruik te maken van de breakeven hyperbool.

Haalbaarheidsformule
$\left(\frac{x}{1,266666}\right)^2 - \left(\frac{y}{3,262753}\right)^2 = 1$
Feasibility check
$2C_{AB}x_A > C$
$0,0525 > 0,019$
OK

Voor de transformatieformules verwijzen wij naar het onderdeel 7.3.6.

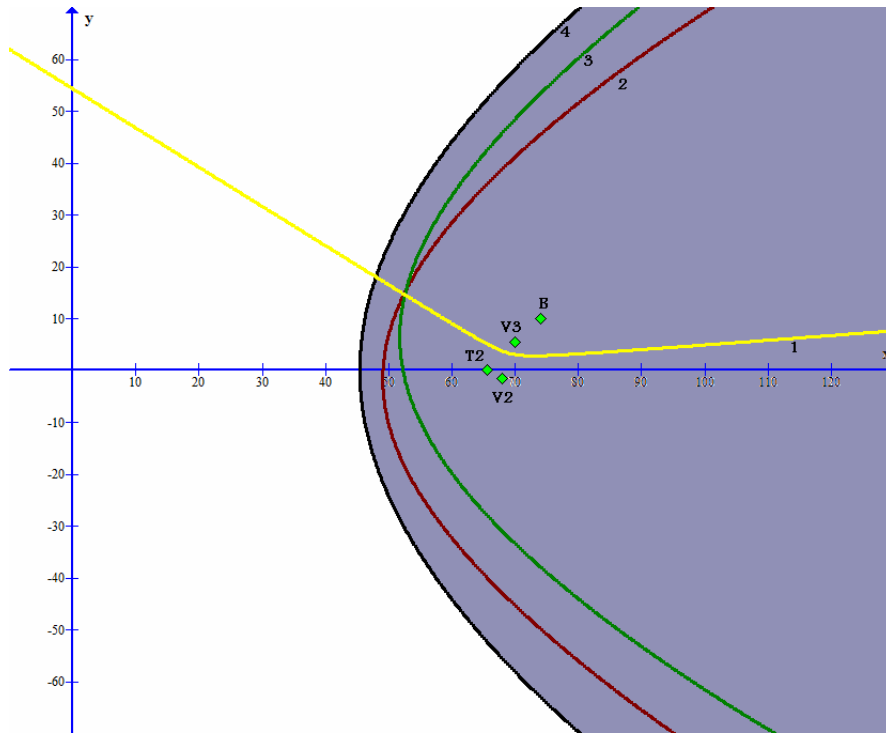
7.5.7 : Totale vergelijking

We beschikken nu terug over vier haalbaarheidsformules. Aangezien zij allen in functie zijn van het achtergrondstelsel, kunnen we de algemene haalbaarheidsgebieden weergeven door de vier haalbaarheidsfiguren tegelijk weer te geven in éénzelfde assenstelsel. In onderstaande figuur doen we dit voor het ecologisch model.



Figuur 7.6 : Voorstelling van de vier ecologische haalbaarheidscurven. B is de eindbestemming, T2, V2 en V3 zijn de eindterminals van respectievelijk het binnenvaarttraject, het spoortraject één en het spoortraject twee. Voor verdere informatie omtrent de identificatie en de interpretatie van de curven, verwijzen we naar de volgende alinea onder deze figuur.

De bovenstaande figuur kan op eenzelfde manier geïnterpreteerd worden als figuur 7.4 in het onderdeel 7.4.7. Ook hier kunnen we de algemene haalbaarheidsgebieden van de verschillende transportgebieden afleiden, door meerdere figuren tegelijk te analyseren. In het onderdeel 7.5.4 en 7.5.5 zijn we tot de conclusie gekomen dat zowel het spoortraject één als twee nooit ecologisch voordeliger wordt dan het binnenvaarttransport. Aangezien het mogelijk haalbaarheidsgebied van beide alternatieven, weergegeven door de figuren (2) en (3), kleiner zijn dan dat van het binnenvaarttransport (4), zullen de beide spooralternatieven geen algemeen haalbaarheidsgebied hebben. Het totale gebied wordt onderverdeeld in twee delen: het gebied waar het binnenvaarttransport het voordeligst is en het gebied waar het unimodaal wegtransport het voordeligst is. De onderstaande figuur illustreert dit.



Figuur 7.7 : Voorstelling van de vier ecologische haalbaarheidscurven en de daaruit volgende algemene haalbaarheidsgebieden voor de vier transportalternatieven. Indien eindbestemming B in het blauwe haalbaarheidsgebied ligt, dan zal het binnenvaarttraject het voordeligste zijn in termen van het ecologisch model. Indien het buiten het blauwe gebied ligt, zal het unimodaal wegtransport voordeliger zijn.

Uit bovenstaande figuur kunnen we zoals in onderdeel 7.4.7 concluderen dat voor het voorbeeld het binnenvaarttransport ecologisch voordeliger is dan de drie andere alternatieven. Dit kunnen we afleiden aangezien de eindbestemming B in het blauwe gebied ligt. In *bijlage 5* hebben we de bovenstaande figuur geprojecteerd op een landkaart van de regio Antwerpen. Uit deze figuur kunnen we duidelijk afleiden dat voor de geconsidereerde transportnoodzaak de regio Antwerpen opgedeeld wordt in twee haalbaarheidsgebieden.

7.6 : Energetisch model

We geven hieronder, net zoals in de vorige paragraaf, de totale kilometerafhankelijke en kilometeronafhankelijke kosten weer voor elk transportalternatief. De noodzakelijke berekeningen om tot deze cijfers te komen, kan men terugvinden in de bijgevoegde Excel-file 'Voorbeeld 1' op de CD-ROM.

Unimodaal wegtransport	
Kilometerafhankelijke kosten (C_{AB})	0,3
Kilometeronafhankelijke kosten (C_w)	0
Multimodaal binnenvaarttraject	
Kilometerafhankelijk (C_{T2B})	0,31

Kilometeronafhankelijk (C_M)	23,55
Multimodaal spoortransport traject één	
Kilometerafhankelijk (C_{V2B})	0,31
Kilometeronafhankelijk (C_M)	19,14
Multimodaal spoortransport traject twee	
Kilometerafhankelijk (C_{V3B})	0,31
Kilometeronafhankelijk (C_M)	19,69

Tabel 7.9 : Weergave van de kilometerafhankelijke en kilometeronafhankelijke kosten van de vier transportalternatieven.

Aangezien we vier transportalternatieven gelijktijdig willen vergelijken met elkaar, is het noodzakelijk dat we zes analyses uitvoeren.

7.6.1 : Unimodaal wegtransport vs multimodaal binnenvaarttraject

Haalbaarheidsformule	
$y^2 = 2773757,7 + 3996,574x - (x^2 + 4290,25) - 117718,36\sqrt{554,6 + 1,5982x}$	
Beginpunt x_1	Eindpunt x_2
39,68032787	1640,5
Feasibility check	
$2C_{AB} \cdot x_A > C$	
$39,3 > 23,55$	
OK	

We dienen bij deze analyse geen transformatie toe te passen aangezien het assenstelsel overeenstemt met het achtergrondstelsel.

7.6.2 : Unimodaal wegtransport vs multimodaal spoortransport traject één

Haalbaarheidsformule	
$y^2 = 1832190 + 3996,6x - (x^2 + 4290,25) - 95674,28\sqrt{366,34 + 1,5982x}$	
Beginpunt x_1	Eindpunt x_2
32,45081967	2081,5
Feasibility check	
$2C_{AB} \cdot x_A > C$	
$39,3 > 19,14$	
OK	

Voor de transformatieformules verwijzen wij naar het onderdeel 7.3.2.

7.6.3 : Unimodaal wegtransport vs multimodaal spoortransport traject twee

Haalbaarheidsformule	
$y^2 = 1939001 + 4118,6x - (x^2 + 4556,25) - 98423,54\sqrt{387,696 + 1,647x}$	
Beginpunt x_1	Eindpunt x_2
33,3852459	2148,5

Feasibility check
$2C_{AB}x_A > C$
$40,5 > 19,69$
OK

Voor de transformatieformules verwijzen wij naar het onderdeel 7.3.3.

7.6.4 : Multimodaal binnenvaartransport vs multimodaal spoortransport traject één

Aangezien de kilometerafhankelijke kosten voor beide alternatieven dezelfde zijn, dienen we gebruik te maken van de breakeven hyperbool.

Haalbaarheidsformule
Onmogelijk om op te stellen : het voordeel van het spoortransport is te groot

Concreet betekent dit dat in geen enkel grafisch punt het binnenvaartransport voordeliger is dan het spoortransport via het traject één.

7.6.5 : Multimodaal binnenvaartransport vs multimodaal spoortransport traject twee

Ook hier dienen we gebruik te maken van de breakeven hyperbool.

Haalbaarheidsformule
Onmogelijk om op te stellen : het voordeel van het spoortransport is te groot

Dit betekent dat in geen enkel grafisch punt het binnenvaartransport voordeliger is dan het spoortransport via het traject twee.

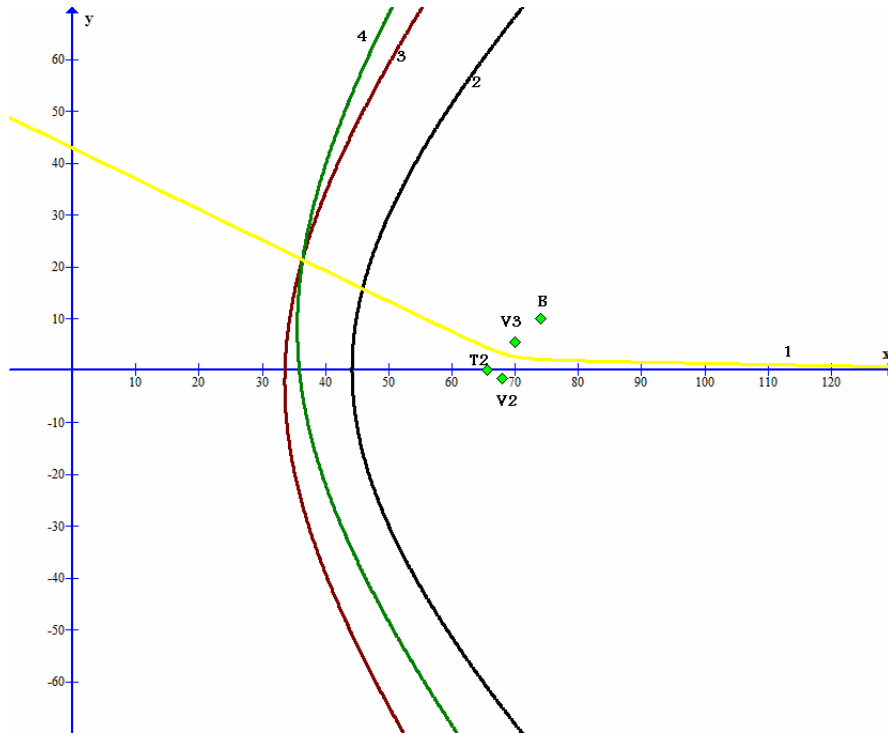
7.6.6 : Multimodaal spoortransport traject één vs spoortransport traject twee

Aangezien de kilometerafhankelijke kosten voor beide alternatieven dezelfde zijn, dienen we gebruik te maken van de breakeven hyperbool.

Haalbaarheidsformule
$\left(\frac{x}{0,887095}\right)^2 - \left(\frac{y}{3,385714}\right)^2 = 1$
Feasibility check
$2C_{AB}x_A > C$
$2,17 > 0,55$
OK

Voor de transformatieformules verwijzen wij naar het onderdeel 7.3.6.

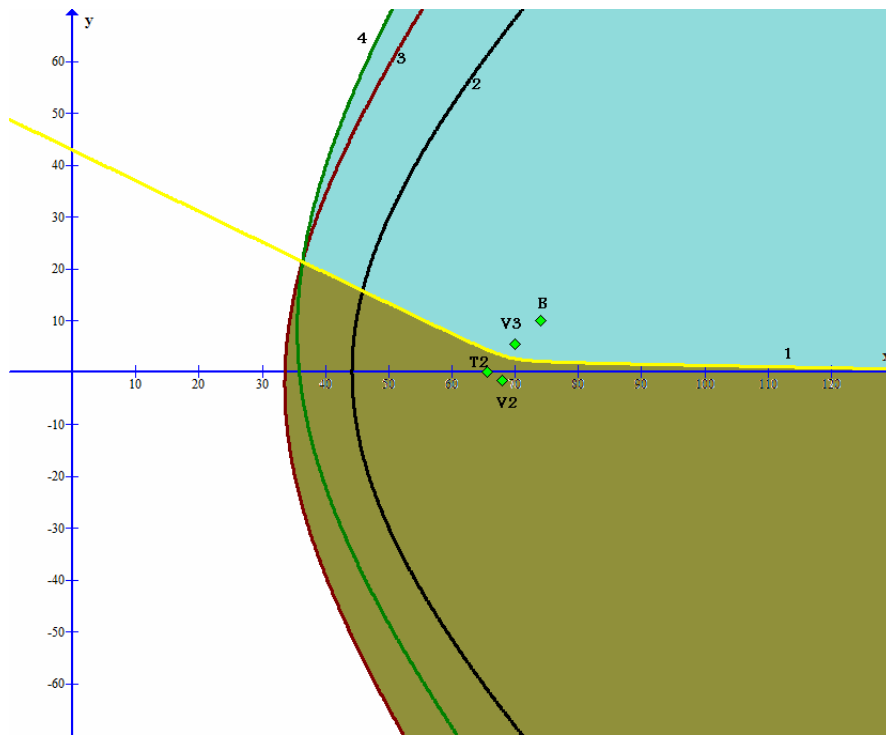
7.6.7 : Totale vergelijking



Figuur 7.8 : Voorstelling van de vier energetische haalbaarheidscurven. B is de eindbestemming, T2, V2 en V3 zijn de eindterminals van respectievelijk het binnenvaarttraject, het spoortraject één en het spoortraject twee. Voor verdere informatie omtrent de identificatie en de interpretatie van de curven, verwijzen we naar de volgende twee alinea's onder deze figuur.

In de bovenstaande figuur worden de vier haalbaarheidsfiguren afgebeeld. De gele figuur (1) geeft de afweging weer van het spoortransport traject één met het spoortransport traject twee. De zwartkleurige figuur (2) geeft de afweging weer van het unimodaal wegtransport met het multimodale binnenvaarttransport. De roodkleurige figuur (3) geeft de afweging weer van het unimodaal wegtransport en het spoortransport traject één. De groenkleurige figuur (4) geeft de afweging weer van het unimodaal wegtransport en het spoortransport traject twee.

In het onderdeel 7.6.4 en 7.6.5 zijn we tot de conclusie gekomen dat zowel het spoortraject één als twee steeds energetisch voordeliger zijn dan het binnenvaarttransport. Aangezien de curven (3) en (4) groter zijn dan (2), zal het binnenvaartalternatief geen algemeen energetisch haalbaarheidsgebied hebben. Het totale gebied wordt dus onderverdeeld in drie haalbaarheidsgebieden. Deze worden in onderstaande figuur weergegeven.



Figuur 7.9 : Voorstelling van de vier energetische haalbaarheidscurven en de daaruit volgende algemene haalbaarheidsgebieden voor de vier transportalternatieven. Indien eindbestemming B in het blauwe, groene, of witte haalbaarheidsgebied ligt, dan zal de voordeligste economische transportwijze gelijk zijn aan respectievelijk het tweede spoortraject, het eerste spoortraject of het unimodaal wegtransport.

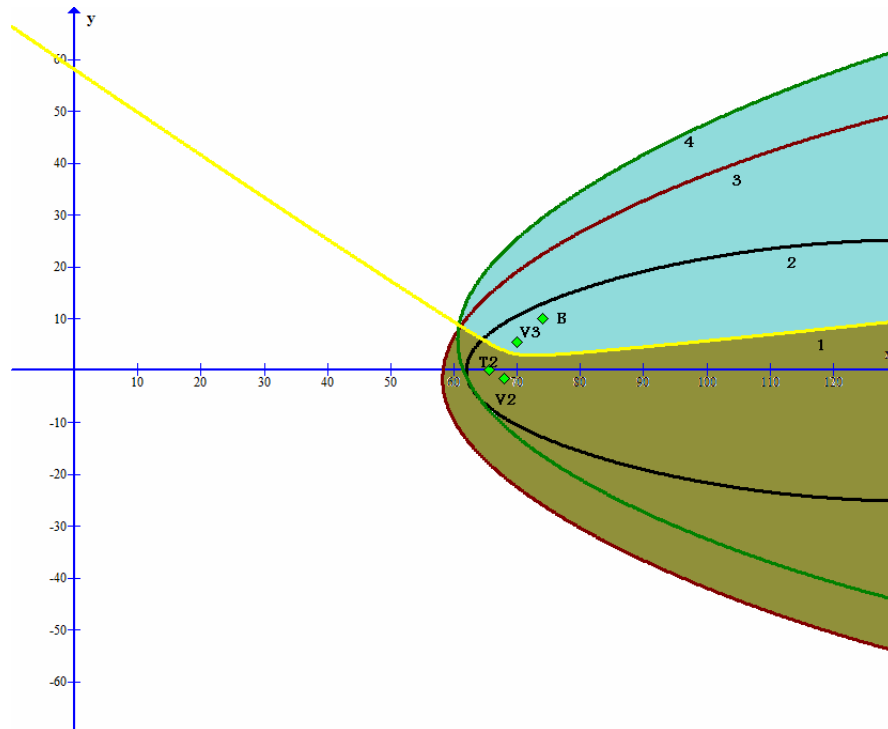
Aangezien de eindbestemming B in het blauwe gebied ligt, zal het spoortransport via traject twee het voordeligst zijn in termen van het energetisch model. In *bijlage 6* hebben we de bovenstaande figuur geprojecteerd op een landkaart van de regio Antwerpen. Uit deze figuur kunnen we duidelijk afleiden dat voor de geconsidereerde transportnoodzaak de regio Antwerpen opgedeeld wordt in drie verschillende haalbaarheidsgebieden.

7.7 : Verdubbeling van de waarde van de te transporteren goederen

In deze paragraaf gaan we na wat de impact is van een stijging van de gemiddelde waarde van de te transporteren goederen op de haalbaarheidsgebieden. Uit hoofdstuk twee weten we, dat de waarde van de goederen invloed heeft op de kosten van de veiligheid-, cyclus- en in transitvoorraad. Des te groter de voorraad, des te sterker de impact zal zijn. We verwachten dus dat de impact van een waardeverhoging groter zal zijn bij de binnenvaartmodus, dan bij het wegtransport.

We geven hieronder onmiddellijk de grafische resultaten weer van een verdubbeling van de waarde van de te transporteren goederen. Indien de lezer geïnteresseerd is in de concrete voorafgaande berekeningen en de uiteindelijke haalbaarheidsformules, verwijzen we hem of haar door naar het bijgevoegde Excel-file 'Voorbeeld 2' op de CD-ROM.

Aangezien een stijging van de waarde van de goederen enkel invloed heeft op het economisch en sociaal-economisch model, zullen we enkel deze laatste twee weergeven.

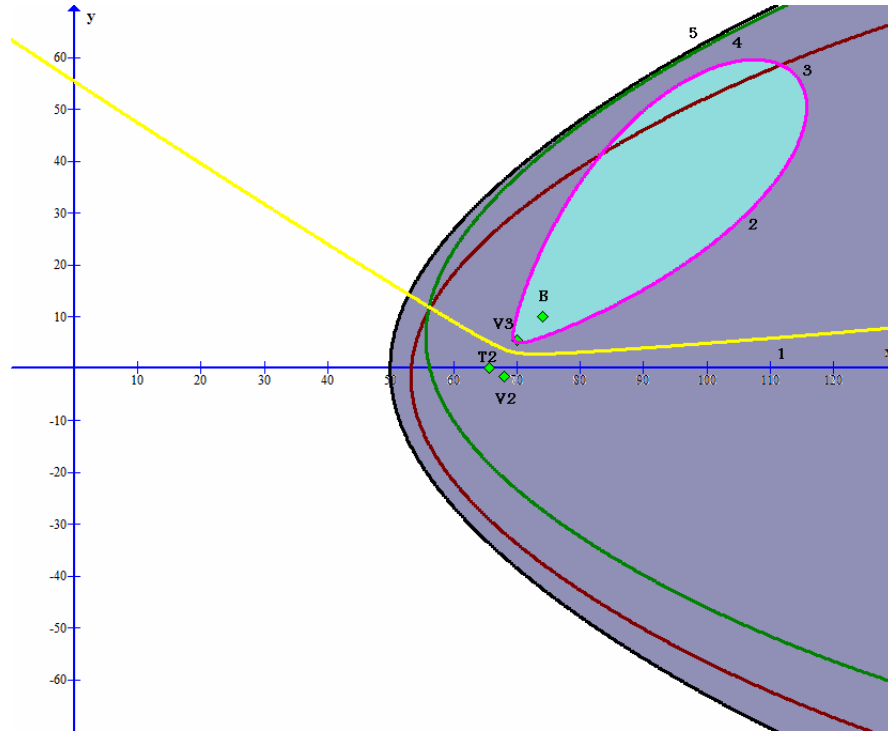


Figuur 7.10 : Voorstelling van de algemene economische haalbaarheidsgebieden voor de vier transportalternatieven bij een verdubbeling van de waarde van de goederen. Indien eindbestemming B in het blauwe, groene, of witte haalbaarheidsgebied ligt, dan zal de voordeligste economische transportwijze gelijk zijn aan respectievelijk het tweede spoortraject, het eerste spoortraject of het unimodaal wegtransport. Ten opzichte van figuur 7.3 heeft het haalbaarheidsgebied van de binnenvaart moeten inboeten. Voor meer informatie verwijzen wij naar de twee volgende alinea's onder deze figuur.

De gele curve (1) geeft de afweging weer van het spoortransport traject één met het spoortransport traject twee. De zwartkleurige curve (2) geeft de afweging weer van het unimodaal wegtransport met het multimodale binnenvaarttransport. De roodkleurige curve (3) geeft de afweging weer van het unimodaal wegtransport en het spoortransport traject één. De groenkleurige curve (4) geeft de afweging weer van het unimodaal wegtransport en het spoortransport traject twee. Het blauwe gebied geeft het haalbaarheidsgebied weer van het spoortransport via traject twee, het groene geeft het haalbaarheidsgebied weer van het spoortransport via traject één, het witte gebied geeft het haalbaarheidsgebied weer van het unimodaal wegtransport.

Indien we deze figuur vergelijken met de figuur 7.3 dan merken we op dat het binnenvaarttraject geen haalbaarheidsgebied meer heeft. Dit kan verklaard worden door de grootte van de laadcapaciteit van de modus. Deze is namelijk het grootste van alle vier transportalternatieven. Daarenboven heeft de binnenvaarmodus de laagste gemiddelde snelheid van de drie verschillende modi. Het gevolg is dan ook dat de veiligheid-, cyclus- en in transitvoorraad de grootste zal zijn. Aangezien de kost van deze voorraden sterk afhankelijk is van hun waarde, zal de binnenvaart het sterkst moeten inboeten in haar haalbaarheidsgebied bij een stijging van de waarde van de goederen. We merken ook op dat de

verhouding blauw/groen kleiner is in bovenstaande figuur ten opzichte van figuur 7.3. Dit kan verklaard worden door het feit dat het spoortransport via traject twee langer duurt dan het via het eerste. Het gevolg is dan ook dat de gemiddelde voorraad iets groter zal zijn in het traject twee ten opzichte van het eerste spoortraject. Uiteraard is het haalbaarheidsgebied van het unimodaal wegtransport het sterkst gestegen, aangezien deze modus veel lagere voorraden benodigd.



Figuur 7.11 : Voorstelling van de algemene sociaal-economische haalbaarheidsgebieden voor de vier transportalternatieven bij een verdubbeling van de waarde van de goederen. Indien eindbestemming B in het blauwe, grijze of witte haalbaarheidsgebied ligt, dan zal de voordeligste economische transportwijze gelijk zijn aan respectievelijk het tweede spoortraject, het binnenvaarttraject of het unimodaal wegtransport. Ten opzichte van figuur 7.5 heeft het haalbaarheidsgebied van de binnenvaart moeten inboeten. Voor meer informatie verwijzen wij naar de twee volgende alinea's onder deze figuur.

De gele curve (1) geeft de afweging weer van het spoortransport traject één met het spoortransport traject twee. De rooskleurige curve (2) geeft de afweging weer van het binnenvaarttransport met het spoortransport via traject twee. De roodkleurige curve (3) geeft de afweging weer van het unimodaal wegtransport en het spoortransport traject één. De groenkleurige curve (4) geeft de afweging weer van het unimodaal wegtransport en het spoortransport traject twee. De zwartkleurige curve (5) geeft de afweging weer van het unimodaal wegtransport met het multimodale binnenvaarttransport. Het blauwe gebied geeft het haalbaarheidsgebied weer van het spoortransport via traject twee, het grijze geeft het haalbaarheidsgebied weer van het binnenvaarttransport.

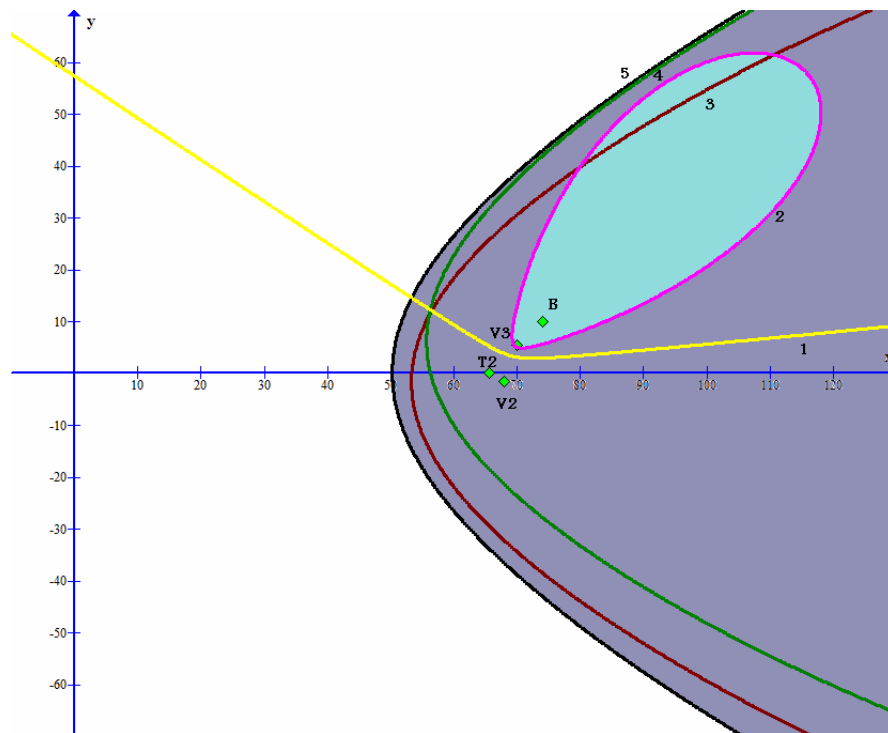
Indien we deze figuur vergelijken met de figuur 7.5 dan merken we op dat het binnenvaarttraject in haar haalbaarheidsgebied heeft moeten inboeten voor het spoortransport via traject twee en het unimodaal wegtransport. De reden hiervoor is dezelfde als bij figuur 7.10. In dit voorbeeld zal het

sociaal-economisch voordeliger zijn om de goederen te transporteren via het spoortraject twee dan elk ander transportalternatief.

7.8 : Een 10% daling van de overslagkosten van multimodale binnenvaarttraject

In deze paragraaf gaan we na wat de impact is van een tien procent daling van de overslagkosten van het multimodaal binnenvaarttraject op de verschillende haalbaarheidsgebieden. Uit hoofdstuk twee weten we dat de overslagkosten een belangrijk onderdeel uitmaken van de totale logistieke kost. We gaan enkel nagaan welke invloed deze wijzingen heeft op het economisch model.

We geven hieronder onmiddellijk de grafische resultaten weer van de wijziging in de overslagkosten van de binnenvaart. Indien de lezer geïnteresseerd is in de concrete voorafgaande berekeningen en de uiteindelijke haalbaarheidsformules, verwijzen we hem of haar door naar het bijgevoegde Excel-file 'Voorbeeld 3' op de CD-ROM.



Figuur 7.12 : Voorstelling van de algemene economische haalbaarheidsgebieden voor de vier transportalternatieven bij een 10% daling van de overslagkosten van de binnenvaart. Indien eindbestemming B in het blauwe, grijze of witte haalbaarheidsgebied ligt, dan zal de voordeligste economische transportwijze gelijk zijn aan respectievelijk het tweede spoortraject, het binnenvaarttraject of het unimodaal wegtransport. Ten opzichte van figuur 7.3 hebben de haalbaarheidsgebieden van het eerste en tweede spoortraject moeten inboeten. Voor meer informatie verwijzen wij naar de twee volgende alinea's onder deze figuur.

De gele curve (1) geeft de afweging weer van het spoortransport traject één met het spoortransport traject twee. De rooskleurige curve (2) geeft de afweging weer van het binnenvaarttransport met het

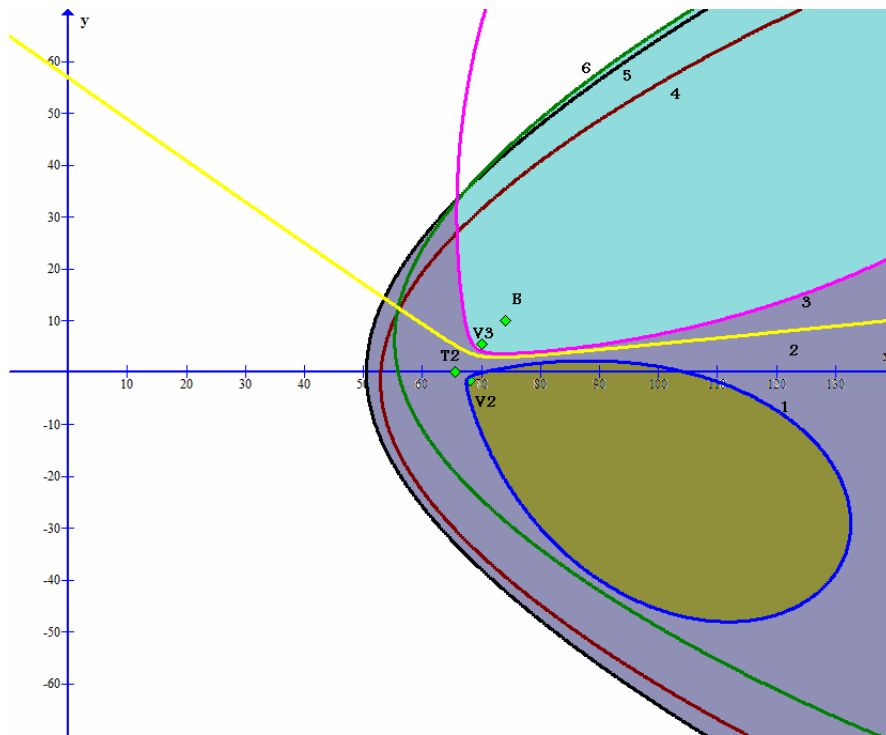
spoortransport via traject twee. De roodkleurige curve (3) geeft de afweging weer van het unimodaal wegtransport en het spoortransport traject één. De groenkleurige curve (4) geeft de afweging weer van het unimodaal wegtransport en het spoortransport traject twee. De zwartkleurige curve (5) geeft de afweging weer van het unimodaal wegtransport met het multimodale binnenvaarttransport. Het blauwe gebied geeft het haalbaarheidsgebied weer van het spoortransport via traject twee, het grijze geeft het haalbaarheidsgebied weer van het binnenvaarttransport.

Indien we deze figuur vergelijken met de figuur 7.3 dan merken we op dat het binnenvaarttraject sterk heeft gewonnen in haar haalbaarheidsgebied ten kosten van het spoortransport traject één en twee en het unimodaal wegtransport. De impact van een 10% daling van de overslagkosten voor de binnenvaart is zelfs zo groot dat het haalbaarheidsgebied van het spoortransport via traject één volledig en van tweede traject grotendeels is opgeslorpt door de binnenvaart. Uiteraard heeft ook het wegtransport moeten inboeten in haar haalbaarheidsgebied. In dit voorbeeld zal het economisch net nog voordeliger zijn om de goederen te transporteren via het spoortraject twee dan elk ander transportalternatief.

7.9 : Internaliseren van 10% van de externe kosten

In deze paragraaf gaan we na wat de impact is van een internalisering van tien procent van de externe kosten op de verschillende haalbaarheidsgebieden. Aangezien het sociaal-economisch model 100% van de externe kosten incorporeert, dienen we enkel de haalbaarheidsgebieden voor het economisch model opnieuw te berekenen.

We geven hieronder onmiddellijk de grafische resultaten weer van de wijziging in de overslagkosten van de binnenvaart. Indien de lezer geïnteresseerd is in de concrete voorafgaande berekeningen en de uiteindelijke haalbaarheidsformules, verwijzen we hem of haar door naar het bijgevoegde Excel-file 'Voorbeeld 4' op de CD-ROM.



Figuur 7.13 : Voorstelling van de algemene economische haalbaarheidsgebieden voor de vier transportalternatieven bij een internalisering van 10% van de externe kosten. Indien eindbestemming B in het blauwe, groene, grijze of witte haalbaarheidsgebied ligt, dan zal de voordeligste economische transportwijze gelijk zijn aan respectievelijk het tweede spoortraject, het eerste spoortraject, het binnenvaarttraject of het unimodaal wegtransport. Ten opzichte van figuur 7.3 hebben de haalbaarheidsgebieden van het eerste en tweede spoortraject moeten inboeten. Voor meer informatie verwijzen wij naar de twee volgende alinea's onder deze figuur

De blauwe curve (1) geeft het resultaat weer van de afweging binnenvaart vs spoortransport via traject één. De gele curve (2) geeft de afweging weer van het spoortransport traject één met het spoortransport traject twee. De rooskleurige curve (3) geeft de afweging weer van het binnenvaarttransport met het spoortransport via traject twee. De roodkleurige curve (4) geeft de afweging weer van het unimodaal wegtransport en het spoortransport traject één. De zwartkleurige curve (5) geeft de afweging weer van het unimodaal wegtransport met het multimodale binnenvaarttransport. De groenkleurige curve (6) geeft de afweging weer van het unimodaal wegtransport en het spoortransport traject twee. Het blauwe, grijze en groene gebied geven respectievelijk de haalbaarheidsgebieden weer van het spoortransport via traject twee, het binnenvaarttransport en het spoortransport via traject één .

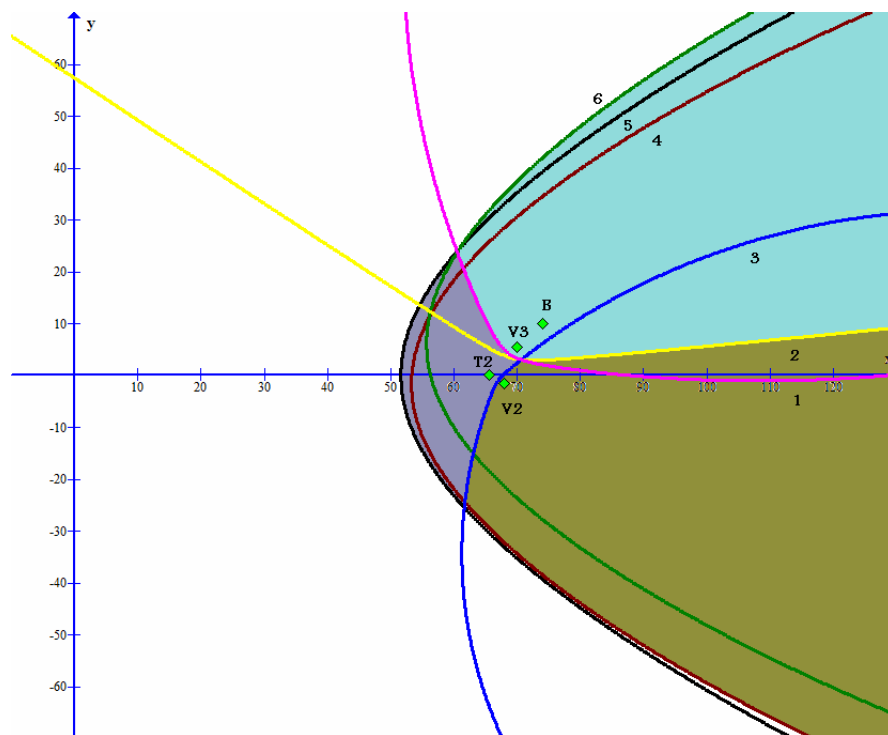
Indien we deze figuur vergelijken met de figuur 7.3 dan merken we op dat het binnenvaarttraject sterk heeft gewonnen in haar haalbaarheidsgebied ten kosten van het spoortransport traject één en twee en het unimodaal wegtransport. Dit kunnen we afleiden uit de kleiner geworden blauwe en groene haalbaarheidsgebieden en de grotere zwartkleurige curve (6). De verkleining van de haalbaarheidsgebieden is proportioneel groter bij het spoortraject één (groen) dan bij het tweede traject (blauw). Dit kan verklaard worden door het feit dat het tweede traject proportioneel gezien meer gebruik maakt van het 'propere' spoortransport dan het eerste traject. Het gevolg is dan ook dat

de stijging van de kosten bij een 10% integratie minder groot is bij het tweede traject dan bij het eerste. In dit voorbeeld zal het nog wel economisch voordeliger zijn om de goederen te transporteren via het tweede spoortransporttraject dan met de andere transportalternatieven.

7.10 : Een 10% stijging van de gemiddelde snelheid van de binnenvaartmodus

In deze paragraaf gaan we na hoe de haalbaarheidsgebieden zouden wijzigingen, indien de gemiddelde snelheid van de binnenvaartmodus stijgt met tien procent. In hoofdstuk twee hebben we aangetoond dat zowel de tijdafhankelijke kosten als de kosten van de veiligheids- en in transitvoorraad mede bepaald worden door de gemiddelde snelheid van de gebruikte modus. Des te hoger de gemiddelde snelheid, des te lager deze kosten. We berekenen opnieuw de haalbaarheidsgebieden voor het economisch model.

We geven hieronder onmiddellijk de grafische resultaten weer van de wijziging in de overslagkosten van de binnenvaart. Indien de lezer geïnteresseerd is in de concrete voorafgaande berekeningen en de uiteindelijke haalbaarheidsformules, verwijzen we hem of haar door naar het bijgevoegde Excel-file 'Voorbeeld 5' op de CD-ROM.



Figuur 7.14 : : Voorstelling van de algemene economische haalbaarheidsgebieden voor de vier transportalternatieven bij een 10% stijging van de gemiddelde snelheid van de binnenvaartmodus. Indien eindbestemming B in het blauwe, groene, grijze of witte haalbaarheidsgebied ligt, dan zal de voordeligste economische transportwijze gelijk zijn aan respectievelijk het tweede spoortraject, het eerste spoortraject, het binnenvaarttraject of het unimodaal wegtransport. Voor meer informatie verwijzen wij naar de twee volgende alinea's onder deze figuur

Voor de identificatie van de verschillende curven en haalbaarheidsgebieden, verwijzen we naar figuur 7.13.

Indien we deze figuur vergelijken met de figuur 7.3 dan merken we geen noemenswaardige verschillen op. We kunnen dus stellen dat de impact van een tien procent stijging van de gemiddelde snelheid van de binnenvaartmodus ,bij een af te leggen afstand van 150 kilometer, marginaal is. In ons voorbeeld blijft het spoortransport via traject twee het voordeligst in termen van het economisch model.

Algemeen besluit

Vlaanderen behoort tot de sterkste transport- en distributieregio's van Europa. Mede hierdoor is het wegvervoer in Vlaanderen in de loop der decennia uitgegroeid tot de absolute nummer één van de klassieke transportmodi. Anno 2008 is het wegtransport goed voor maar liefst 75 procent van het totaal goederenvervoer in Vlaanderen. Dit staat in schril contrast met de andere transportmodi.

Deze evolutie kunnen we verklaren aan de hand van twee factoren. De eerste factor verklaart de populariteit van het wegtransport in termen van intrinsieke voordelen en troeven. Het wegtransport geniet namelijk van een zeer hoge flexibiliteit, een relatief hoge gemiddelde snelheid, een goede bereikbaarheid, een hoge betrouwbaarheid en verschillende typen van rijdend materieel welke specifiek aangepast zijn aan de aard van de te transporteren goederen. De tweede factor maakt gebruik van een extrinsiek voordeel om de populariteit van het wegtransport te verklaren. Het wegvervoer wordt namelijk bevoordeeld ten opzichte van de andere traditionele transportmodi doordat er geen rekening wordt gehouden met de externe kosten. Het wegvervoer wordt hierdoor bevoordeeld aangezien de externe kosten per tonkm, na het luchttransport, de hoogste zijn van alle verschillende transportmodi. Aangezien deze kosten tot op heden niet betaald dienen te worden, is de prijs van het wegtransport ten opzichte van de andere modi relatief te laag. Het gevolg is dat het huidige niveau van wegtransport hoger ligt dan het maatschappelijk optimum. Er zijn ook andere nadelen verbonden aan het gebruik van het wegtransport. Ironisch genoeg worden deze veroorzaakt door het succes van het wegtransport zelf. We denken ondermeer aan congestievorming, de nefaste impact van het wegvervoer op het milieu, de geluidsoverlast, het grote aantal ongevallen op de weg, de schade aan het wegdek en de slinkende energievoorraden.

Uiteraard heeft elke transportmodus zijn specifieke voor- en nadelen. Vandaar dat het combineren van verschillende transportmodi, welke we definiëren als het multimodaal transport, een oplossing kan bieden voor de verwezenlijking van een gedeeltelijke modale verschuiving van het wegvervoer naar het spoor- en/of binnenvaartransport. Deze modale verschuiving is nodig indien we de nefaste gevolgen van de explosieve groei in de transportsector willen verminderen. Het multimodaal transport kan deze modale verschuiving mee helpen realiseren doordat het combineren van verschillende transportmodi het mogelijk maakt om de specifieke nadelen van één transportmodus te verhelpen door de voordelen van een andere modus en aldus de combinatie aantrekkelijker te maken dan de som van het geheel en het wegtransport.

Hoewel het gebruik van gecombineerd transport op zich een eenvoudig en aantrekkelijk alternatief biedt, wordt de te nemen transportbeslissing in een organisatie er niet makkelijker op. Theoretisch gezien dient men de verschillende transportalternatieven af te wegen ten opzichte van elkaar rekening houdend met specifieke beperkingen. Het beste alternatief is dan de optimale oplossing. In de praktijk is het echter niet eenvoudig om de verschillende alternatieven te vergelijken met elkaar. Vandaar dat we in deze eindverhandeling geografische modellen ontwikkeld hebben die als doel hebben de

beleidsnemer te ondersteunen in het nemen van de hierboven geschetste transportbeslissingen. Aangezien de modellen de verschillende transportalternatieven dienen af te wegen ten opzichte van elkaar, was het noodzakelijk om eerst verschillende vergelijkingscriteria te ontwikkelen. In deze thesis maken we onderscheid tussen vier vergelijkingscriteria, namelijk het economisch, sociaal-economisch, ecologisch en energetisch criterium. Elk vergelijkingscriterium maakt gebruik van een andere set beoordelingsparameters. Elk haalbaarheidsmodel maakt gebruik van één specifiek vergelijkingscriterium. In de hoofdstukken twee en drie hebben we deze vier vergelijkingscriteria ontwikkeld. In de hoofdstukken vier, vijf en zes hebben we de verschillende grafische haalbaarheidsmodellen ontwikkeld welke gebruik maken van de vergelijkingscriteria als inputparameters.

In *hoofdstuk twee* hebben we het economisch vergelijkingscriterium behandeld. Dit criterium zal op basis van de totale logistieke kosten elk alternatief afwegen. De totale logistieke kost van een transportalternatief kan onderverdeeld worden in een variabel en een constant deel, namelijk het kilometerafhankelijk en kilometeronafhankelijk deel. De tijdsafhankelijke kosten worden getransformeerd naar kilometerafhankelijk door gebruik te maken van gemiddelde snelheden. Het economisch vergelijkingscriterium kiest voor elke specifieke afstand het transportalternatief met de laagste totale economische kosten. Uit de literatuur blijkt dat de interne transportkost van zowel het binnenvaart- als spoortransport aanzienlijk goedkoper is dan het wegtransport. Het probleem echter is dat de hoge voorraad-, overslag-, voortransport- en natransportkosten zwaar doorwegen bij het multimodaal transport. Vandaar dat de breakeven afstand voor het multimodaal transport sterk beïnvloed wordt door de eventuele aan- of afwezigheid van het voor- of natransport en het niveau van de overslagkosten. Men kan dus met andere woorden het multimodaal transport aanmoedigen door te investeren in nieuwe overslagterminals en overslagtechnieken en in algemene infrastructuur.

In het *derde hoofdstuk* hebben we zowel het sociaal-economisch, ecologisch als het energetisch vergelijkingscriterium uitgewerkt. Het ecologisch criterium maakt gebruik van de ecologische externe kosten om voor elk transportalternatief de totale ecologische kost te berekenen. Ook hier wordt er een onderscheid gemaakt tussen kilometerafhankelijke en kilometeronafhankelijke kosten. Het alternatief dat voor een specifieke afstand de laagste totale ecologische kosten heeft, wordt als optimaal aanzien voor die specifieke afstand. Uit de literatuur blijkt dat voornamelijk het wegtransport ecologische externe effecten veroorzaakt, terwijl zowel het binnenvaart- als spoortransport veel minder belastend is voor het milieu. Uiteraard zullen de ecologische overslag-, voortransport- en natransportkosten een mogelijk belangrijke invloed hebben op de totale ecologische kost van multimodale trajecten. Het gebruik van elektrisch aangedreven overslagtechnieken helpen de multimodale trajecten om hun groot ecologisch voordeel te behouden.

Het sociaal-economisch vergelijkingscriterium is gelijkaardig aan het economisch criterium. Het enigste verschil tussen beide is dat het eerste zowel gebruik maakt van de totale logistieke kosten als de totale externe kosten. De totale sociale kost van een transportalternatief voor een specifieke afstand bedraagt de optelsom van zowel de totale logistieke als de externe kost voor die afstand.

Deze methode kiest voor elke specifieke afstand het transportalternatief met de laagste sociaal-economische kosten. Indien een beleidsnemer bewust gebruik maakt van het sociaal-economisch vergelijkingscriterium, zal hij met andere woorden niet enkel rekening houden met de totale economische kosten die hij en zijn leverancier of klant draagt, maar evenzeer met de kosten die het transport veroorzaakt aan onvergoede derden. Door het internaliseren van deze externe kosten kan men de faling van de vrije markt tenietdoen. Met andere woorden, men kan door het toepassen van dit vergelijkingscriterium de sociaal optimale transportwijze bekomen. Uit de literatuur blijkt dat de interne transportkost inclusief de externe kost voor het binnenvaart- en spoortransport aanzienlijk lager zijn dan die van het wegtransport. Vandaar dat we verwachten dat de breakeven afstand van het multimodaal transport kleiner zal zijn bij ceteris paribus internalisering van de externe kosten. Indien men op Europees niveau deze multimodale transportwijzen wil aanmoedigen en stimuleren, dan kan men dit realiseren door ofwel te investeren in overslagterminals en overslagtechnieken, ofwel door het (gedeeltelijk) internaliseren van de externe kosten, ofwel door subsidies toe te kennen aan multimodale trajecten om het verschil in externe kosten te compenseren, of tenslotte door een combinatie van deze factoren.

Het laatst uitgewerkte vergelijkingscriterium is het energetische. Hierbij gaat men voor elke afstand en elk transportalternatief na hoeveel energie men nodig heeft om het traject af te leggen. De verschillende alternatieven worden met elkaar vergeleken, en de energievriendelijkste, namelijk diegene welke het minste energie verbruikt, wordt gekozen. Ook hier zal de totale verbruikte energie van een multimodaal traject sterk afhankelijk zijn van de gebruikte overslagtechnieken en de al dan niet aanwezigheid van voor- en/of natransport.

Na de vier vergelijkingscriteria te hebben geconstrueerd, hebben we verschillende geografische haalbaarheidsmodellen ontwikkeld in de hoofdstukken vier, vijf en zes. Deze modellen geven op basis van de verschillende vergelijkingscriteria de geografische haalbaarheidsgebieden weer voor elk transportalternatief. We hebben drie typen modellen ontwikkeld. Hoewel deze modellen substantieel verschillen van elkaar in rekenwijze en resultaten, kunnen ze alle drie op eenzelfde manier geïnterpreteerd worden.

In het *vierde hoofdstuk* hebben we het eerste geografisch haalbaarheidsmodel ontwikkeld. Dit model is in staat om een specifiek unimodaal transportalternatief te vergelijken met een specifiek multimodaal transportalternatief. Hierbij zijn we er vanuit gegaan dat een partij goederen dient getransporteerd te worden van een vertrekpunt A naar een specifiek eindpunt B. Daarenboven veronderstelden we dat de kost per tonkm van het natransport gelijk is aan de kost per tonkm van het unimodaal transport. Hoewel deze veronderstelling in de meeste gevallen niet realistisch is, bestaan er situaties waar de kost van het natransport en het unimodaal transport in tonkm nagenoeg gelijk zijn. Na heel wat wiskundige berekeningen en vereenvoudigingen, bekwamen we een modelmatige formule welke de grens weergeeft tussen de haalbaarheidsgebieden van het unimodaal en het multimodaal transport. Een haalbaarheidsgebied is een regio waarbinnen de eindbestemming moet liggen opdat het in overweging genomen transportalternatief het voordeligste is in termen van het model. Indien

we deze formule uitplotten op de landkaart bekomen we een hyperbool. We noemen deze figuur ook wel de breakeven hyperbool. Deze geeft, zoals reeds gezegd, de grens weer tussen de twee haalbaarheidsgebieden. Uiteraard zijn deze gebieden afhankelijk van de inputparameters. Om de gevoeligheid van deze gebieden na te gaan hebben we een uitgebreide sensitiviteitsanalyse uitgevoerd op alle inputparameters. Hieruit bleek dat de haalbaarheidsgebieden uiterst gevoelig zijn voor wijzigingen van de lengte van het voor- en natransport, de overslagkosten, de waarde van de te transporteren goederen en de gemiddelde snelheid van de modi.

In het *vijfde hoofdstuk* hebben we het tweede geografisch haalbaarheidsmodel ontwikkeld. Dit is gelijkaardig aan het eerste model mits één uitzondering: de kost per tonkm van het natransport dient niet meer gelijk te zijn aan de kost per tonkm van het unimodaal transport. Door deze aanpassing zal dit model in de meeste gevallen realistischer zijn dan het eerste. Hoewel deze wijziging op het eerste zicht niet zo belangrijk lijkt, heeft het grote gevolgen bij de afleiding van het model en het construeren van de haalbaarheidsgebieden. Na uitgebreide wiskundige berekeningen en veel vereenvoudigingen, bekwamen we een modelmatige formule welke, net zoals het eerste model, de grens weergeeft tussen de haalbaarheidsgebieden van het unimodaal en het multimodaal transport. Het grote verschil met het eerste model is dat deze formule geen hyperbool meer weergeeft maar wel een eivormig gebied. Dit is fundamenteel verschillend, aangezien in het eerste model beide haalbaarheidsgebieden oneindig groot zijn en in het tweede model één haalbaarheidsgebied oneindig groot is en de andere slechts een beperkt gesloten gebied omvat. In de meeste gevallen zal het gesloten haalbaarheidsgebied overstemmen met het multimodaal transportalternatief. In een economische context is het bestaan van een gesloten haalbaarheidsgebied in plaats van een niet gesloten gebied realistischer en aannemelijker. Net zoals bij het eerste geval zijn de twee haalbaarheidsgebieden afhankelijk van de inputparameters, vandaar dat we in het vijfde hoofdstuk ook een uitgebreide sensitiviteitsanalyse uitvoeren. Hieruit blijkt dat de haalbaarheidsgebieden, net zoals in het eerste geval, uiterst gevoelig zijn voor wijzigingen van de lengte van het voor- en natransport, de overslagkosten, de waarde van de te transporteren goederen en de gemiddelde snelheid van de modi.

In het *zesde hoofdstuk* hebben we twee varianten van het tweede model ontwikkeld en creëerden we een derde type haalbaarheidsmodel. De twee varianten zijn gelijkaardig aan het tweede model, met als enige verschil de typen transportalternatieven die vergeleken worden met elkaar. De twee vorige modellen vergeleken steeds één type van unimodaal transport met één type van multimodaal transport. De twee varianten vergelijken twee vormen van multimodale transportalternatieven met elkaar. De eerste variant vergelijkt twee multimodale trajecten die beide gebruik maken van dezelfde hoofdtransport modus. Een voorbeeld van een dergelijke situatie is wanneer men bij het gebruik van één specifieke hoofdtransport modus de keuze heeft uit twee mogelijke eindterminals om de eindbestemming te bereiken. De tweede variant vergelijkt twee verschillende typen van multimodale transportalternatieven die elk gebruik maken van een andere hoofdtransport modus. Een voorbeeld is de vergelijking tussen het multimodaal binnenvaarttransport en het multimodaal spoortransport.

De eerste twee geografische haalbaarheidsmodellen waren enkel in staat om twee transportalternatieven te vergelijken met elkaar. Uiteraard worden beleidsnemers meestal geconfronteerd met meerder transportalternatieven. Vandaar dat we een model ontwikkeld hebben welke in staat is om theoretisch een oneindig aantal transportalternatieven gelijktijdig te vergelijken met elkaar. Dit derde model bestaat uit het uitvoeren van meerdere analyses gebaseerd op het tweede en/of eerste model waarna deze resultaten via transformaties omgevormd worden tot één globaal resultaat. In dit globaal resultaat kan men de haalbaarheidsgebieden van de verschillende transportalternatieven aflezen. Dit laatste model aanzien we als het meest realistisch en flexibel model. Het is mogelijk om even welk transportalternatief bijkomend te introduceren in het model. Er is geen theoretische limiet van het aantal alternatieven dat men gelijktijdig kan vergelijken en men is volledig vrij bij de keuze van de verschillende typen transportalternatieven die men introduceert. We dienen echter wel op te merken dat naarmate het aantal te vergelijken alternatieven toeneemt, het concreet moeilijker wordt om de verschillende haalbaarheidsgebieden te interpreteren. Dit neemt echter niet weg dat dit model werkelijk kan aanzien worden als een beleidsinstrument dat de transportgerelateerde beslissingen van een transportgebruiker kan ondersteunen. Uiteraard zal het wel de transportgebruiker zelf zijn die de uiteindelijk beslissing dient te nemen.

We hebben de haalbaarheidsgebieden van de geografische modellen steeds geïnterpreteerd als een regio waarbinnen de eindbestemming moet liggen opdat het in overweging genomen transportalternatief het voordeligste is in termen van het model. Indien echter de analyse uitgevoerd wordt op een mogelijk transport waarbij de eindbestemming nog niet concreet bestaat dan is het mogelijk om deze modellen te gebruiken om de optimale locatie te vinden. De beleidsnemer kan dan nagaan waar de eindbestemming moet liggen opdat hij optimaal gebruik kan maken van een door hem gespecificeerde transportmodus. De modellen kunnen ook gebruikt worden door overheids- of private instanties die als doel hebben bepaalde alternatieve transportwijzen te stimuleren. Met deze modellen kunnen zij nagaan welke transportalternatieven optimaal zijn bij bepaalde trajecten en welke acties zij kunnen ondernemen om een bepaalde transportwijze aantrekkelijker te maken. Zij kunnen namelijk op een iteratieve wijze nagaan wat de invloed is van hun acties op de haalbaarheidsgebieden en de uiteindelijk optimale transportwijze. Aangezien deze twee laatste situaties minder frequent voorvallen in de praktijk, hebben we in deze eindverhandeling hier minder aandacht aan besteed.

We dienen echter wel een algemene bedenking te formuleren bij de praktisch toepassing van de ontwikkelde geografische haalbaarheidsmodellen. Hoewel we gepoogd hebben om de modellen zo realistisch mogelijk te maken, blijven het modelleringen van de werkelijkheid, en is het praktisch onmogelijk om de werkelijkheid perfect te modelleren. Zo veronderstellen we dat het unimodale- en het natransporttraject rechtlijnig van aard zijn. We kunnen de nadelen van deze veronderstelling gedeeltelijk omzeilen door te werken met artificiële verbindingpunten in het traject. Desalniettemin zal er mogelijk een klein verschil bestaan tussen de werkelijke situatie en de gemodelleerde situatie. Desondanks zijn we er van overtuigd dat de resultaten die de modellen geven een goede benadering zijn van de werkelijkheid en dat het verschil in de resultaten tot een minimum beperkt blijft.

Lijst van de geraadpleegde werken

Boeken

- Baumol, W.J., Vinod, H.D., 1970, *An inventory theoretic model of freight transport demand*, Management Science, Vol. 16 No 7, pp. 413-421
- Blauwens, G., *Algemene transporteconomie*, standaard uitgeverij, Antwerpen, 1985, 140p
- Blauwens, G., De Baere, P. en Van de Voorde, E. (1996) *Vervoerseconomie*, Antwerpen
- Blauwens, G., De Baere, P. en Voorde, E. Van De, *Vervoerseconomie*, standaard uitgeverij, Antwerpen, 2001, 555p.
- Button, K., 1993, *Transport economics*, University press Cambridge, p. 267
Cunningham, W. (1982), 'Freight modal choice and competition in transportation : a critique and categorization of analysis techniques', Transportation Journal, Vol. 21, pp. 66-75
- Evy Cuypers; 2007; Hasselt; *multimodaal vervoer: economische, energetische en ecologische analyse*, p.157
- De Brabanter, B., 2007, *De waardering van dodelijke verkeerslachtoffers in Vlaanderen*, verkeersveiligheid, Diepenbeek, p. 41
- De Ceuster G., 2004, *Internalisering van externe kosten van wegverkeer in Vlaanderen*, Studie uitgevoerd in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, MIRA, Transport & Mobility Leuven.
- De Geest, Govaerts, Timmermans, Matheys, Van Mierlo, *Energie efficiëntie kan beter*, MITRA, 2006, p. 44
- Evans, A.W., 1992, *Road congestion: the diagrammatic analysis*, journal of political economy, 100, 211-17
- Fenchel, W., *Elementary geometry in hyperbolic space*, Berlin, 1989,
- McKinnon, A., Button, K., Nijkamp, P., 2002, *Transport logistics*, Edward Elgar, p. 680

- M. Maibach, C. Schreyer, D. Sutter (INFRAS), H.P. van Essen, B.H. Boon, R. Smokers, A. Schroten (CE Delft), C. Doll (Fraunhofer Gesellschaft – ISI), B. Pawlowska, M. Bak (University of Gdansk), *Handbook on estimation of external cost in the transport sector: Internalisation Measures and Policies for All external Cost of Transport (IMPACT)*, Delft, CE, 2007, p. 336
- An Molenaerts; 2004; Hasselt; *Haalbaarheidsstudie voor intermodaal vervoer met binnenvaart*; p. 144
- Nicolopoulou, P., Hens, L., Howard, C.V., 2005, *Environmental health impacts of transport and mobility*, springer, Dordrecht, p. 324
- Ribus, 2007, Hasselt, *De totale logistieke kosten in multimodaal goederenvervoer*, p. 210
- Silver, E., Peterson, R., 1985, *Decision systems for inventory management and production planning*, edition 2, p. 72220
- Veelenturf, J. en Higler, A. (1998) *Handboek Logistiek Management*, Schoonhoven, Academic Service
- Vlaamse Milieumaatschappij, 2007, *Lozingen in de lucht 1990-2006*, VMM, p. 254
- Katy Willems; 2003; Hasselt; *Multimodaal goederenvervoer en de totale logistieke kostprijs*; p. 130
- Witlox, F., Vervoersbeleid, U Hasselt, diepenbeek, 2007, p.180

Artikels

- Clyde. E (2006), '*packaging costs*', p. 11
- De Rijck, '*Schoon schip, schone lucht*', De standaard, donderdag 6 maart 2008
- De standaard, '*E313-snelweg is verzadigd*', De standaard, woensdag 3 oktober 2007
- De standaard, '*Europese prijs voor Vlaams PPS-project*', De standaard, vrijdag 7 maart 2008
- Goossenaerts, '*Oosterweel zal jaarlijks 56 levens eisen door fijn stof*', De standaard, woensdag 5 maart 2008

- Hummels, D., 2001, 'Have international transportation costs declined?', University of Chicago, p. 42
- Rietveld, P., Vickerman, R., 2004, 'Transport in regional science: The "death of distance" is premature', free university Amsterdam, p. 21
- Schulz. J. , 2000, 'Can it get any worse?', traffic world, pp. 37-39
- Sertyn, 'Het verkeersinfarct is een feit', De standaard, dinsdag 5 februari 2008
- Trunick, P. 2004, 'How to beat the high cost of shipping', Logistics today, pp. 22-24
- Ysebaert, 'Geef ons roetfilters', De standaard, dinsdag 19 februari 2008
- Ysebaert, 'Ongevallen raken niet onder controle', De standaard, donderdag 6 maart 2008

Internetadressen

- Belgische spoorwegen (online) (geraadpleegd op 10 maart 2008) Beschikbaar op <<http://www.belrail.be>>
- Brussels Observatorium voor Duurzame Consumptie (online) (geraadpleegd op 12 februari 2008) Beschikbaar op <<http://www.observ.be>>
- Centraal Bureau voor de Statistiek (online) (geraadpleegd op 12 februari 2008) Beschikbaar op <<http://www.cbs.be>>
- De scheepvaart (online) (geraadpleegd op 12 november 2007) Beschikbaar op <<http://www.descheepvaart.be>>
- Europese Commissie (online) (geraadpleegd op 10 februari 2008) Beschikbaar op <<http://ec.europa.eu>>
- FEBIAC (online) (geraadpleegd op 12 februari 2008) Beschikbaar op <<http://www.febiac.be>>
- MIRA (online) (geraadpleegd op 18 februari 2008) Beschikbaar op <<http://www.milieurapport.be>>
- Nationaal instituut voor de statistiek (online) (geraadpleegd op 12 februari 2008) Beschikbaar op <<http://www.statbel.fgov.be>>
- Promotie Binnenvaart Vlaanderen (online) (geraadpleegd op 10 maart 2008) Beschikbaar op <<http://www.binnenvaart.be>>
- Vlaams Instituut voor de logistiek (online) (geraadpleegd op 11 februari 2008) Beschikbaar op <<http://www.vil.be>>

Bijlagen

Bijlage 1 : De 'inventory-theoretic' aanpak	- 196 -
Bijlage 2 : Onderzoeksresultaten van De Brabander	- 197 -
Bijlage 3 : Weergave van de economische haalbaarheidsgebieden van het voorbeeld in hoofdstuk 7	- 198 -
Bijlage 4 : Weergave van de sociaal-economische haalbaarheidsgebieden van het voorbeeld in hoofdstuk 7	- 199 -
Bijlage 5 : Weergave van de ecologisch haalbaarheidsgebieden van het voorbeeld in hoofdstuk 7	- 200 -
Bijlage 6 : Weergave van de energetisch haalbaarheidsgebieden van het voorbeeld in hoofdstuk 7	- 201 -

Bijlage 1 : De 'inventory-theoretic' aanpak

Het model beoogt de indifferentiecurve van de vervoersgebruiker op het vlak van de keuze van modi te bepalen. Het doel is het kiezen van een modus of combinatie van modi die zal leiden tot een minimalisatie van de totale logistieke kost van het transport. Bij deze minimalisatie zal men zowel rekening houden met de kenmerken van de te transporteren goederen, als de eigenschappen van de modi. (McKinnon, A., 2002)

Het inventory-theoretic biedt verschillende voordelen bij het bepalen van de indifferentiecurve (Cunningham, 1982). Deze zijn ondermeer:

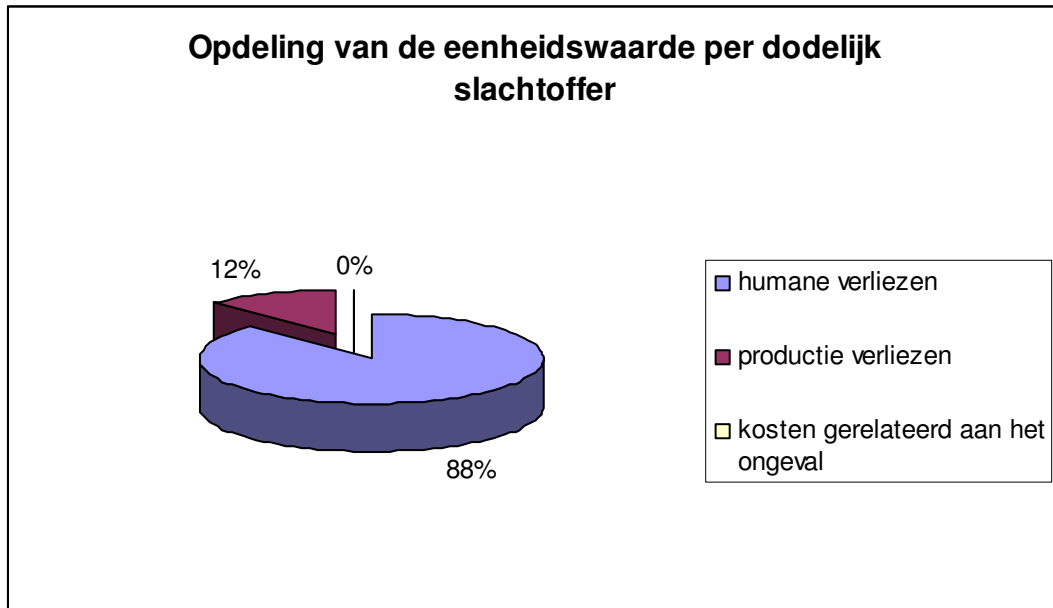
- Alle beschikbare numerieke data betreffende de goederen en de modi kunnen tegelijkertijd opgenomen worden in de modellering.
- Het model kan steeds uitgebreid worden door nieuwe modale karakteristieken.
- Er is steeds de mogelijkheid tot feedback: hierbij dient men de geadviseerde modale split te vergelijken met de werkelijke split.

Cunningham (1982) merkt wel op dat er ook aan het inventory-theoretic verbonden zijn. De voornaamste worden hieronder weergegeven.

- Aangezien het een micro-economisch model is, dient men over veel specifieke gegevens te beschikken indien men het model correct wil toepassen. Omwille van deze reden is het vaak moeilijk om correcte conclusies te nemen.
- Sommige data is moeilijk te verkrijgen omdat ze bestaan uit vage en slecht kwantificeerbare elementen.
- Indien de vervoergebruiker niet naar een minimalisatie van de totale logistieke kosten streeft maar bijvoorbeeld naar een minimale levertijd, dan kan men het model niet toepassen.
- In het inventory-theoretic wordt geen rekening gehouden met mogelijke gedragsfactoren die een invloed zouden kunnen hebben op de transportbeslissing. Hierbij negeert men de perceptie van de vervoersgebruiker.

Bijlage 2 : Onderzoeksresultaten van De Brabander

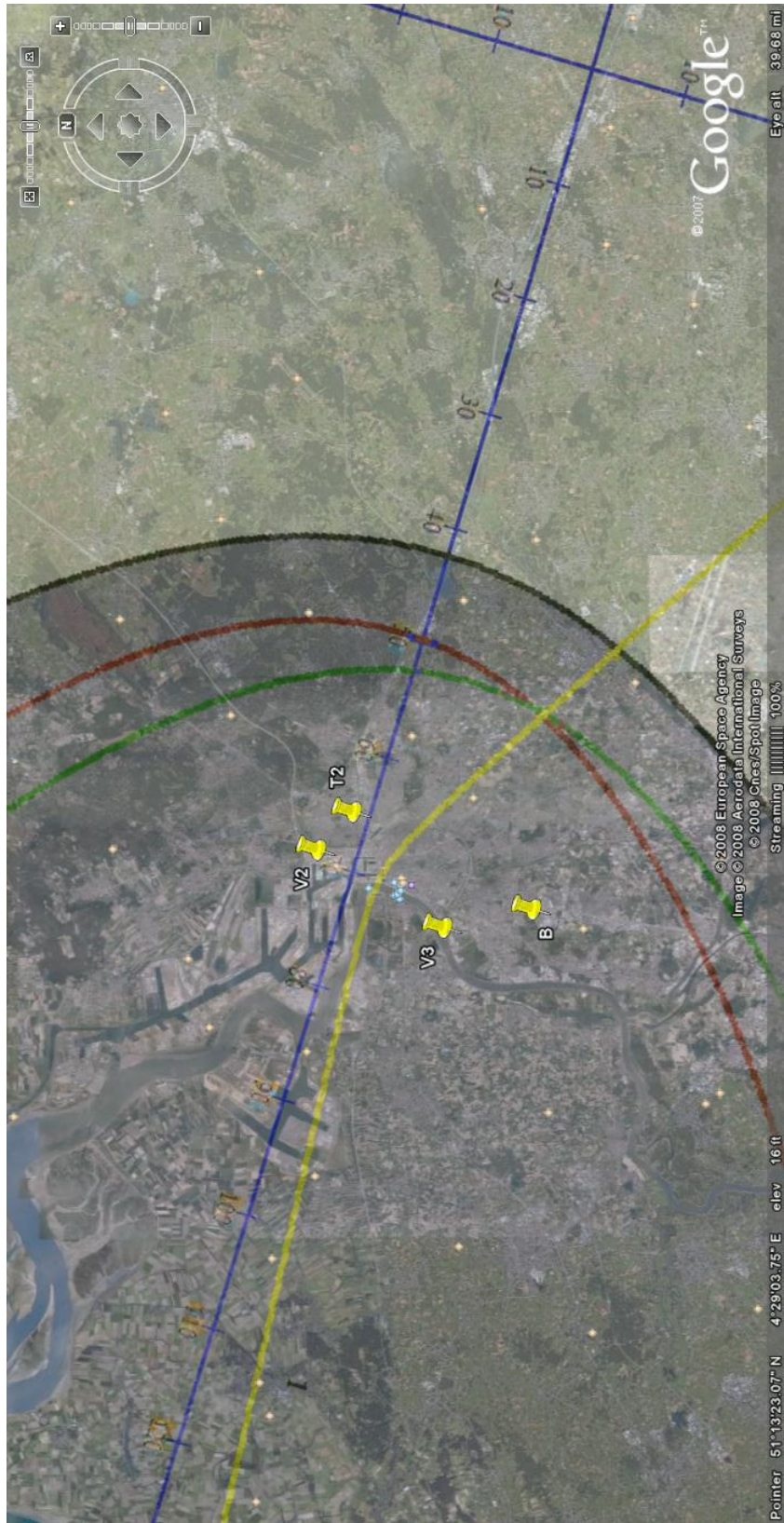
Eenheidswaarde per dodelijk slachtoffer (in Euro)	5.681.122
- Humane verliezen	4.967.488
- Productie verliezen	705.998
- Medische kosten	5.866
- Bezoekkosten	96
- Vervroegde begrafeniskosten	1.674
Kosten gerelateerd aan het ongeval	6.612



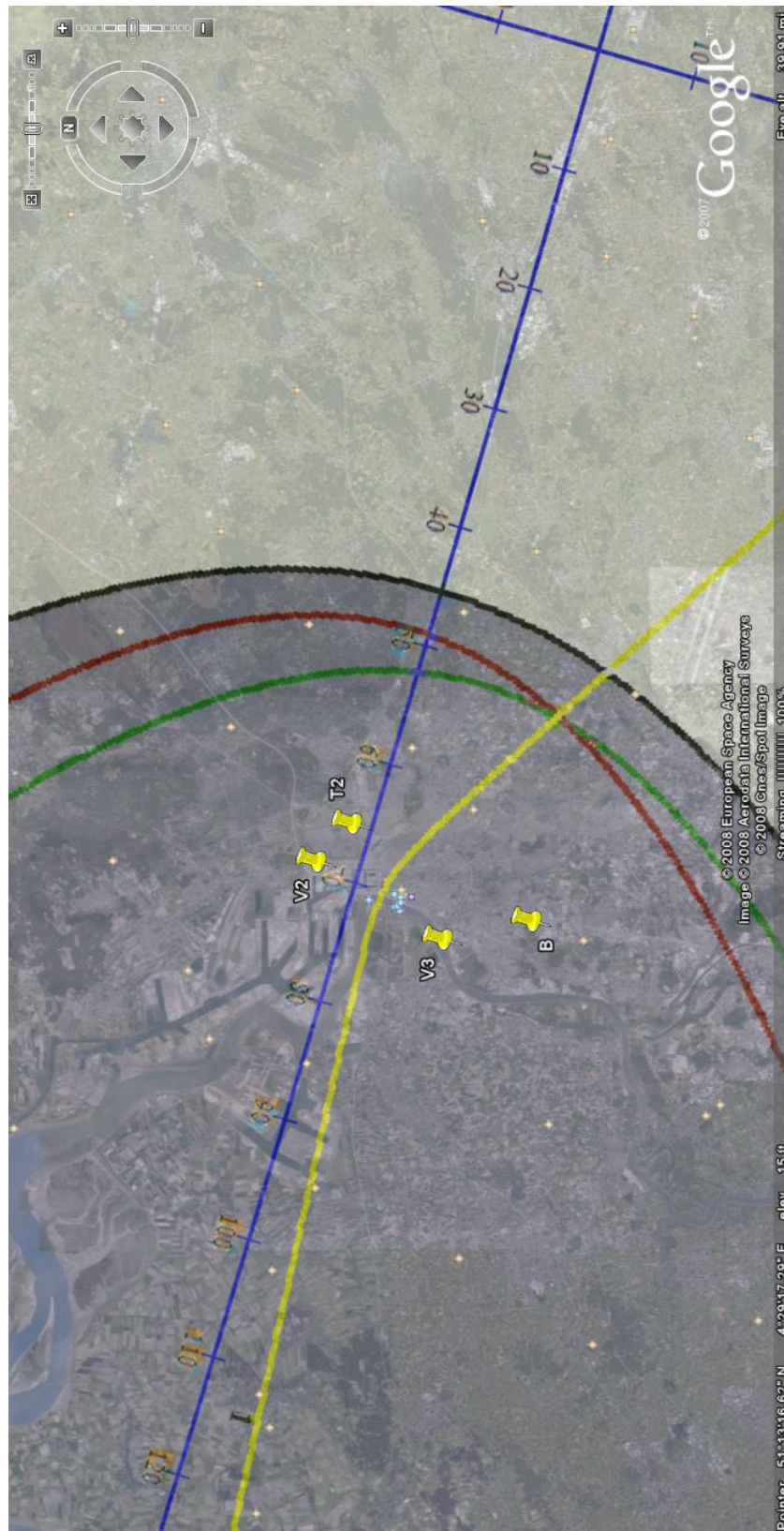
Bijlage 3 : Weergave van de economische haalbaarheidsgebieden van het voorbeeld in hoofdstuk 7: traject Luik - Antwerpen



Bijlage 4 : Weergave van de sociaal-economische haalbaarheidsgebieden van het voorbeeld in hoofdstuk 7: traject Luik - Antwerpen



Bijlage 5 : Weergave van de ecologisch haalbaarheidsgebieden van het voorbeeld in hoofdstuk 7: traject Luik - Antwerpen



Bijlage 6 : Weergave van de energetisch haalbaarheidsgebieden van het voorbeeld in hoofdstuk 7: traject Luik - Antwerpen

