

## **DEEL 2: NETWERKEN EN INFRASTRUCTUUR- PLANNING**

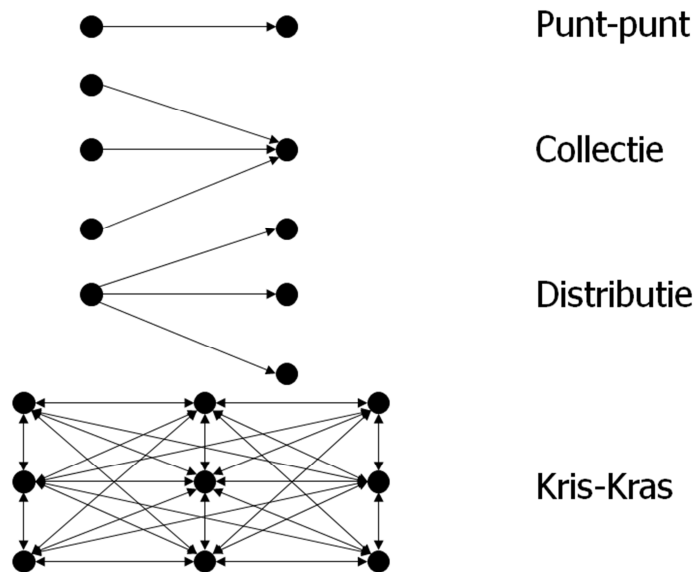
In dit tweede deel staat de infrastructuur centraal. Het gaat hierbij om (infrastructuur-) netwerken en de vraag hoe we de bereikbaarheid kunnen verbeteren door netwerken aan te passen. Als een netwerk moet worden uitgebreid is een tracé ontwerp nodig. Verder zijn er formele procedures waaraan moet worden voldaan. In deze procedures moeten allerlei effecten van de infrastructuur op het gebied van veiligheid, geluidshinder, luchtkwaliteit en natuurlijk financiële consequenties worden bepaald. Achtereenvolgens komen aan bod:

- Netwerkenkarakteristieken
- Netwerkontwerp
- Methodiek voor het ontwerpen van regionale netwerken
- Tracering
- Planvormen en planprocedures
- Bepaling effecten van infrastructuur:
  - geluid, luchtkwaliteit, verkeersveiligheid en kosten-batenanalyse

<b>DEEL 2: NETWERKEN EN INFRASTRUCTUURPLANNING</b>	<b>1</b>
<b>1 NETWERKEN</b>	<b>3</b>
1.1 Schaalniveaus en netwerken	4
1.2 Netwerkvormen en netwerkligging	7
1.3 Kengetallen	14
<b>2 NETWERKONTWERP</b>	<b>16</b>
2.1 Het ontwerpen van een verkeersnetwerk	16
2.2 Ontwerpdilemma's	18
2.3 Bundeling en hiërarchie	20
2.4 Uitbouw van netwerken	22
<b>3 ONTWERPMETHODIEK VOOR REGIONALE NETWERKEN</b>	<b>25</b>
3.1 Inleiding ontwerpmethodiek voor regionale netwerken	25
3.2 Uitgangspunten ontwerpmethodiek	25
3.3 Vuistregels voor de belangrijkste kenmerken van de vervoersystemen	27
3.4 Schema ontwerpstappen	28
3.5 Toepassing van de ontwerpmethodiek	30
3.5.1 Kernenhiërarchie	30
3.5.2 Gewenste verbindingen	31
3.5.3 Ideaaltypisch net	32
3.5.4 Analyse bestaand net	33
3.5.5 Ontwerpen reële netwerken	34
<b>4 INFRASTRUCTUURPLANNING</b>	<b>36</b>
4.1 Inleiding	36
4.2 Tracering	36
4.2.1 De Zeefanalyse	36
4.2.2 Het aanbrengen van een cellulair grid	37
4.2.3 Potential surface analysis	38
4.3 Planvormen en planprocedures	40
4.3.1 Planvormen	40
4.3.2 Procedures voor infrastructuurprojecten	41
4.4 Bepaling effecten van infrastructuuralternatieven	42
4.4.1 Geluidshinder	42
4.4.2 Luchtkwaliteit	44
4.4.3 Verkeersveiligheid	48
4.4.4 Economische effecten	50

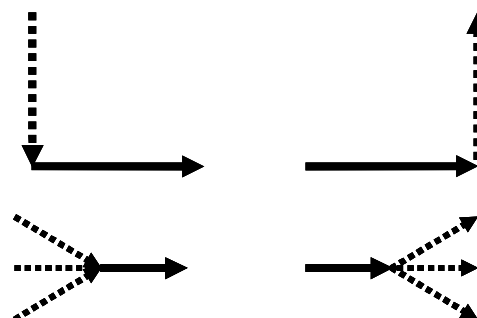
# 1 NETWERKEN

Netwerken zijn essentieel voor het transportsysteem. Zonder netwerken is geen transport mogelijk. Voor een goede analyse is het belangrijk goed onderscheid te maken tussen vraagpatronen, netwerken van vervoerdiensten en infrastructuurnetwerken. Vraagpatronen geven een beschrijving van de vraag in ruimte (en tijd). Typische voorbeelden zijn weergegeven in Figuur 1.1. Woon-werkverplaatsingen kenmerken zich iets meer door collectie en distributiepatronen (ochtend en avondspits) terwijl voor sociale verplaatsingen kris-kraspatronen meer relevant zijn.



FIGUUR 1.1: VOORBEELDEN VAN VRAAGPATRONEN

Om deze vervoervraag te faciliteren zijn netwerken van vervoerdiensten nodig. Die kunnen hetzelfde patroon volgen, maar vaak zijn andere netwerkvormen efficiënter. In het geval van collectie kan een voertuig eerst alle herkomsten langsgaan en pas daarna naar de bestemming rijden (zie Figuur 1.2). Een andere oplossing is dat kleine voertuigen naar een tussengelegen overslag/overstappunt gaan en dat voor het (langere) traject naar de bestemming een groot voertuig wordt gebruikt. Met dit soort vervoerdienstnetwerken neemt het aantal voertuigkilometers fors af.



FIGUUR 1.2: VOORBEELDEN VAN BUNDELING DOOR VERVOERDIENSTEN VOOR COLLECTIE (LINKS) EN DISTRIBUTIE (RECHTS)

Om deze vervoerdiensten te faciliteren zijn infrastructuurnetwerken nodig. De NS kan immers niet rijden als er geen spoor of spoorcapaciteit beschikbaar is. Ook hier geldt dat een infrastructuurnetwerk een afwijkende vorm kan hebben dan het vervoerdienstnetwerk, bijvoorbeeld omdat het infrastructuurnetwerk meer vervoerdiensten moet faciliteren. Consequentie is dat bij een gegeven infrastructuurnetwerk nog steeds een groot aantal vervoerdienstnetwerken mogelijk is.

In dit hoofdstuk staan met name de infrastructuurnetwerken ofwel verkeersnetwerken centraal. Allereerst wordt in paragraaf 1.1 ingegaan op de verschillende schaalniveaus die te onderscheiden zijn. In paragraaf 1.2 wordt de algemene functionele indeling van netwerken en de vormen waarin zij voorkomen behandeld. Ook wordt de ligging van netwerken ten opzichte van kernen behandeld. In de laatste paragraaf komen wat karakteristieken van netwerken aan bod.

## 1.1 Schaalniveaus en netwerken

De functie van verkeersnetwerken is het fysiek mogelijk maken van de verplaatsing van reizigers en vracht, hetzij door tussenkomst van vervoermiddelen hetzij direct. De bekendste typen infrastructuurnetwerken zijn het wegennet, het spoorwegennet en het netwerk van binnenvaartwegen. Een pijpleidingnetwerk is het bekendste voorbeeld van vervoer zonder tussenkomst van vervoermiddelen. Binnen een infrastructuurnetwerk zijn een aantal componenten te onderscheiden, infrastructuurelementen genaamd:

- *toegangspunten*: dit zijn plaatsen waar reizigers, vracht of vervoermiddelen het infrastructuurnetwerk kunnen binnengaan of verlaten. Voorbeelden zijn: op- en afritten van autosnelwegen, stations, parkeerplaatsen en overslagterminals.
- *schakels*: deze hebben primair tot doel de toegangspunten met elkaar te verbinden. Kernmerken van schakels zijn reistijden, reiskosten, en capaciteit (bijvoorbeeld 2000 vtg/h per rijstrook of 20 treinen/h per spoor).
- *knooppunten*: dit zijn plaatsen waar drie of meer schakels, behorende tot hetzelfde netwerk, bij elkaar komen, zoals een klaverblad van autosnelwegen of een splitsing van spoorbanen. Ook knooppunten hebben capaciteiten. Deze worden echter bepaald door de organisatie van het knooppunt.
- *buffer- en stallingsvoorzieningen*: deze hebben tot doel om voertuigen voor, tijdens en na het gebruik voor kortere of langere tijd te kunnen 'opbergen'.

Naast deze netwerkeigenschappen is er in de laag van verkeersdiensten ook sprake van de regeling van het gebruik van het netwerk. Hierbij is te denken aan wie gebruik mag maken van de infrastructuur (rijbewijs, voertuigeisen), verkeersregels, verkeersregelingen, dynamische verkeersmaatregelen, venstertijden, het milieuvignet, enzovoorts.

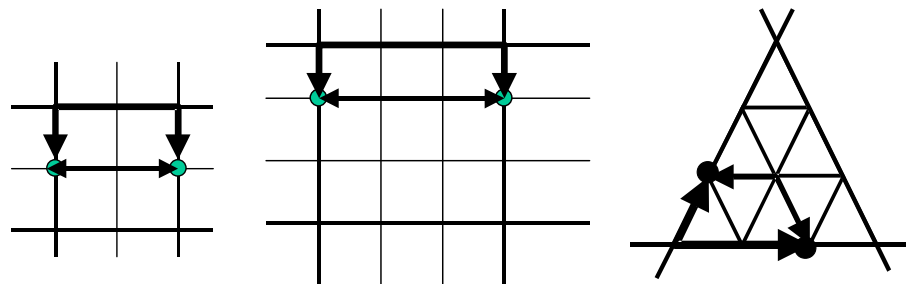
De toegangspunten van een infrastructuurnetwerk kunnen in eerste instantie als abstractie van kernen dan wel nederzettingen gezien worden. Kernen zijn niet allemaal van even groot belang. Kleine dorpen hebben een relatief grote lokale betekenis, maar hebben meestal geen belangrijke betekenis op nationaal niveau. Grote steden hebben zowel een grote lokale betekenis als een nationale of zelfs internationale betekenis. Kernen hebben dus een functie of beter gezegd functies op een bepaald ruimtelijk-functioneel schaalniveau. De te onderscheiden schaalniveaus zijn volgens Van Nes (2002) (inwoneraantallen zijn indicatief):

- Metropool: 10.000.000 inwoners
- Agglomeratie: 1.000.000 inwoners
- Stad: 100.000 inwoners
- Plaats: 10.000 inwoners
- Dorp: 1.000 inwoners

Ook binnen stedelijke kernen is een onderverdeling mogelijk in wijken, stadsdelen en 'steden'. In de literatuur zijn ook andere indelingen te vinden. Kernpunt is dat bepaalde functies een bepaalde massa nodig hebben om te functioneren en daarmee een relatie hebben met bijvoorbeeld het aantal inwoners. Bovendien willen dergelijke voorzieningen ook vaak bij elkaar in de buurt zitten. Dit is een van de agglomeratiefactoren. Een beroemd voorbeeld hiervan is het probleem van roomijsverkopers door Hotelling (1929). Veronderstel een strand van 1 kilometer lang, met een gelijke verdeling van de gasten langs het strand. Er zijn twee roomijsverkopers die een identieke kwaliteit en verscheidenheid van roomijs verkopen voor dezelfde prijs. De vraag is waar zij hun zaken zullen neerzetten. Een logische oplossing zou zijn dat elk van hen 500 meter van het strand zou selecteren en zo een punt bij of 250 meter of 750 meter zal kiezen. Echter, als één van hen iets meer richting het midden beweegt, zal zijn marktaandeel ten koste van de ander stijgen. Daarom is het eerlijkste resultaat dat beide verkopers bij het midden van het strand worden gevestigd. In die situatie is de toegankelijkheid niet meer een concurrentiefactor.

Ook in verkeersnetwerken is sprake van schaalniveaus. Op zich is het snel duidelijk dat één soort netwerk niet geschikt is voor alle verplaatsingen, en met name niet geschikt voor alle verplaatsingsafstanden. In het algemeen betekent dit dat voor langere afstanden de reistijden te lang worden. Onderscheid maken naar verschillende netwerken die elk zijn toegesneden op specifieke afstandscategorieën leidt in principe tot kortere reistijden, en aangezien tijd ook geld is dus tot lagere reiskosten. Aangezien netwerken voor langere verplaatsingsafstanden grofmaziger zijn, zijn ook minimalisatie van investeringskosten, milieuoverlast en versnippering argumenten voor het onderscheiden van stelsels.

Het feit dat een onderscheid in stelsels logisch is, zegt echter nog niets over het aantal stelsels. Voor wegennetwerken is met een morfologische benadering een schaalfactor 3 gevonden, dat wil zeggen dat de maaswijdte (afstand tussen parallelle wegen) van een hoger orde stelsel een factor 3 groter is (De Jong (1988b)). Uit analyses van Van Nes (2002) blijkt dat een dergelijke schaalfactor vrij natuurlijk volgt uit de eigenschappen van wegennetwerken en het gebruik daarvan. Deze schaalfactor kan bijvoorbeeld worden onderbouwd door een analyse van maximale omrijfactoren bij een systeem van twee netwerkniveaus (Figuur 1.3). Het minimaal vereiste kwaliteitsverschil tussen de opeenvolgende netwerkniveaus wordt gevonden bij een schaalfactor 3. De gemiddelde snelheid op dat hogere orde netwerk is dan 50 % hoger voor driehoeksnetwerken en 67 % hoger voor rechthoekige netwerken.



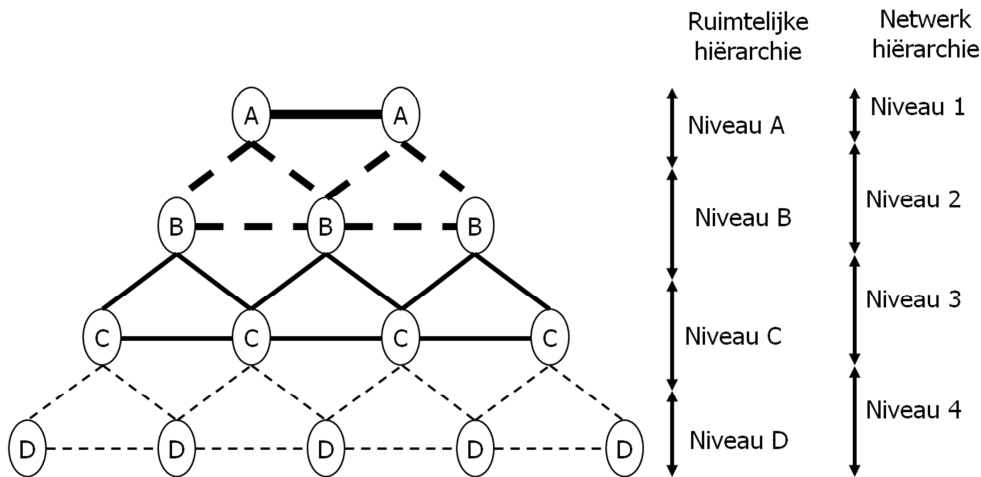
FIGUUR 1.3: VOORBEELDEN VAN MAXIMALE OMRIJROUTES VIA HOGER ORDE NETWERK

Een verklaring voor de factor 3 kan worden gevonden in de schaalniveaus voor de ruimtelijke structuur. Ook hier is op grond van morfologische kenmerken een schaalfactor 3 gevonden (De Jong (1988a)), een factor die overigens ook een plausibele verklaring heeft in agglomeratietheorieën. Dit betekent dat het onderscheid in stelsels voor het interlokale openbaar vervoersysteem direct wordt bepaald door het onderscheid in schaalniveaus van de ruimtelijke structuur. De koppeling tussen ruimtelijk schaalniveau en het schaalniveau van het netwerk heeft ook een logische verklaring. Een hoger schaalniveau netwerk heeft ook voldoende massa oftewel vervoervraag nodig om rendabel te kunnen zijn.

Indien als functioneel schaalniveau 'Nederland' wordt genomen, zijn de grote steden in de Randstad en eventueel Eindhoven de echte agglomeraties. Hieraan kunnen de internationale mainports Schiphol en de Rotterdamse haven worden toegevoegd (als toegangspunten van het internationaal netwerk). Het volgende niveau zijn de steden met rond de 100.000 inwoners, enzovoort. In het algemeen is er een verband tussen schaalniveau en afstandsklasse: naarmate een hoger schaalniveau in beschouwing wordt genomen, neemt de afstand tussen de belangrijke kernen (A-kernen) toe. Dit is echter niet altijd het geval, in sommige gevallen is de afstand tussen kernen van internationaal niveau (Londen en Parijs) van dezelfde orde grootte als de afstand tussen nationale kernen (Hannover-Stuttgart). Overigens is de verplaatsingstijd in functionele zin vaak belangrijker dan de verplaatsingsafstand.

Vervoer maakt verbindingen tussen kernen mogelijk; omdat niet elke kern van even groot belang is, is er ook sprake van een ruimtelijk-functionele afbakening van vervoerrelaties, van diensten en van infrastructuur. In aansluiting op het onderscheid tussen de verschillende kern-classes, wordt daarom onderscheid gemaakt tussen verschillende infrastructuurklassen (zie Figuur 1.4):

- infrastructuur die type A-kernen onderling verbindt, wordt hier aangeduid met klasse 1 infrastructuur;
- infrastructuur die type B-kernen verbindt met A-kernen en de B-kernen onderling, wordt hier aangeduid met klasse 2 infrastructuur;
- infrastructuur die type C-kernen verbindt met B-kernen en de C-kernen onderling, wordt aangeduid met klasse 3 infrastructuur; enzovoort.



FIGUUR 1.4: KERNTYPEN EN NETWERKNIVEAUS

Vanuit de optiek van een bepaald schaalniveau is infrastructuur die valt onder klasse 1, 2 of 3, te beschouwen als hoofdinfrastructuur voor dat bepaalde schaalniveau. In Tabel 1.1 is een aantal karakteristieken van de verschillende netwerkniveaus weergegeven. Merk op dat de hoogste netwerkniveaus niet zijn ingevuld. Dit komt doordat de vereiste snelheden niet mogelijk zijn. Bij het openbaar vervoer daarentegen wel, denk aan de hogesnelheidstreinen!

Netwerk niveau	Ruimtelijk schaalniveau	Maaswijdte [km]	Afstand toegangspunten [km]	Snelheid [km/h]
<b>Stedelijk</b>				
<b>Straat</b>	Wijk	1	0,3	20
<b>Hoofdweg</b>	Stadsdeel	3	1	35
<b>Stadsautoweg</b>	'Stad'	10	3	55
<b>Interstedelijk</b>				
<b>Lokaal</b>	Dorp	3	1	35-40
<b>Regionaal</b>	Plaats	10	3	60-70
<b>Interregionaal</b>	Stad	30	10	100-120
<b>Nationaal</b>	Agglomeratie	-	-	-
<b>Internationaal</b>	Metropool	-	-	-

TABEL 1.1: KARAKTERISTIEKEN VOOR SCHAALNIVEAUS IN WEGENNETWERKEN (VAN NES, 2002)

Vervoerrelaties op een hoger functioneel schaalniveau vereisen een hogere vervoer kwaliteit (snelheid, betrouwbaarheid); hoofdinfrastructuur moet daarom mogelijkheden bieden om deze hogere vervoer kwaliteit te kunnen bieden. Infrastructuur die vervoer mogelijk maakt tussen kernen die op een bepaald niveau van belang zijn (A-B, B-B), heeft een verbindende functie. Infrastructuur die vervoer mogelijk maakt tussen gebieden (en kernen) van een lager schaalniveau enerzijds en de verbindende infrastructuur anderzijds, heeft een ontsluitende functie. Infrastructuur die op een bepaald schaalniveau een ontsluitende functie vervult, kan op een lager functioneel schaalniveau

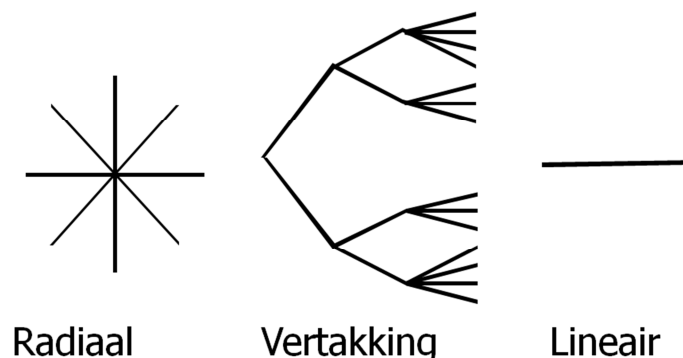
een verbindende functie vervullen doordat dankzij deze infrastructuur vervoer mogelijk wordt tussen kernen die op dat lagere functionele schaalniveau van belang zijn. Hoofdwegen in een stedelijke agglomeratie verbinden de verschillende stadsdelen onderling, maar ontsluiten de stedelijke agglomeratie vanaf bijvoorbeeld het autosnelwegennet dat een verbindende functie heeft tussen de verschillende stedelijke agglomeraties.

Veel infrastructuur is multifunctioneel: op die infrastructuur vindt een bundeling plaats van soms sterk verschillende functionele vervoerrelaties. Zo functioneren bepaalde delen van het autosnelwegennet zowel voor verkeer over lange afstand als voor verkeer op regionale en stadsgewestelijke schaal. Hetzelfde geldt voor delen van het spoorwegennet. Veel trajecten worden zowel door intercity's als door stoptreinen gebruikt.

## 1.2 Netwerkvormen en netwerkligging

De vorm die een netwerk heeft, is onder meer van invloed op de kwaliteit die geboden kan worden (omwegfactoren), de structurerende werking die van de infrastructuur uitgaat (wel of niet centraal gericht) en de vervoerfuncties die met een netwerk kunnen worden vervuld (wel of niet concentreren van stromen, wel of niet tweerichtingsvervoer toepasbaar). Tussen netwerkvorm en functie kan dus een duidelijke relatie bestaan; de vorm van een netwerk is daarom van wezenlijk belang. In eerste instantie kan onderscheid worden gemaakt naar open en gesloten netwerken.

### Open netwerken



FIGUUR 1.5: OPEN NETWERKEN

In open netwerken zijn eindpunten niet direct, maar indirect via andere knooppunten, dus via een omweg, met elkaar verbonden. Vaak worden open netwerken gekenmerkt door een radiale structuur, waarbij er duidelijk sprake is van een centrale knoop. Een open netwerk zal dan de functie van de centraal gelegen kern benadrukken. Vaak komt het voor dat de radialen zich naar buiten toe vertakken. Kenmerkend blijft echter dat de eindpunten van een open netwerk niet direct met elkaar verbonden zijn. Er kunnen overigens twee bijzondere vormen van een open netwerk onderscheiden worden. Het eerste geval betreft een lineair of axiaal netwerk. Het tweede geval betreft een waaivormige vertakkingstructuur vanuit een (niet centraal gelegen) punt.

Open netwerken (kunnen) worden toegepast indien:

- Het verkeer in hoofdzaak is gericht van en naar een centrale kern, waarbij de relaties tussen nevenkernen van ondergeschikt belang zijn;
- Er sprake is van een laag schaalniveau, waarbij omwegen die optreden vanwege het ontbreken van directe verbindingen, niet zwaar wegen;
- Indien de omloopsnelheden (zeer) hoog zijn.

Een duidelijk voorbeeld van een stervormig net op een hoog schaalniveau is het Franse nationale spoorwegennet (met name het TGV-net); dit is in sterke mate gericht op Parijs. Ook het stadsgewestelijke RER-systeem van Parijs is in opzet stervormig met een knooppunt in het

centrum van Parijs (Châtelet). Het netwerk van Parijse metrolijnen heeft een veel minder duidelijke radiale structuur; het is, in het bijzonder in het centrum van Parijs, op te vatten als een gesloten netwerk.

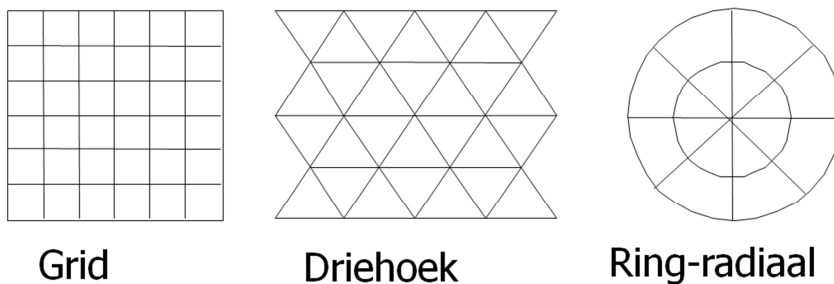
Op lager schaalniveau zijn radiale ontsluitingsstructuren vooral te vinden in steden die min of meer vanuit het centrum gelijkmatig organisch gegroeid zijn; alle hoofdwegen zijn op het centrum gericht. Bij radiale structuren is in principe het centrum het best bereikbare punt van het gehele stedelijk gebied; daar treedt dan ook de hoogste verkeersdruk op. Bij het autovervoer keert echter de wal het schip: daar waar de meeste activiteitenruimten gesitueerd zijn en er daarom de meeste ruimte en de hoogste verblijfskwaliteiten voor voetgangers moeten zijn, vragen ook verkeersintensiteiten de meeste ruimte.

Veelal zijn ter ontlasting van de hoge verkeersdruk op het centrum één of meer ringwegen toegepast. Daarnaast is in het verleden in bepaalde gevallen de oplossing voor de hoge verkeersintensiteiten gezocht door de realisering van nieuwe, op massaal autoverkeer afgestemde radialen; deze werden wel aangeduid als op het stadshart gerichte leven brengende verkeersaders, zoals de Sebastiaansbrug in Delft.

Algemeen geldt dat open netwerken weinig geschikt zijn voor situaties als er min of meer intensieve relaties tussen eindpunten bestaan. Dit geldt nog in sterkere mate indien het gaat om ruimte-intensieve verkeersstromen zoals bij het autosysteem. Open netwerken met een vertakkingstructuur zijn daarom slechts op het laagste niveau (straten met erffunctie) toepasbaar.

Zoals gesteld, is een lineair/axiale structuur een bijzondere vorm van de radiale structuur. De meest in het oog springende voorbeelden zijn de stedelijke gebieden die zijn ontstaan door lintbebouwing langs een (hoofd)- verkeersweg. Overigens zijn lineaire steden lang niet altijd het resultaat van een langzaam gegroeide situatie. Soms zijn lineaire steden bewust gepland. Voorbeelden zijn de door Craig in de 18e eeuw ontwikkelde plannen voor Edinburgh en de in 1882 door Don Arturo Soria y Matta ontworpen "Ciudad Lineal" bij Madrid. Dit betrof het ontwerp voor een stad voor 30.000 inwoners, gesitueerd aan weerszijden van een 40-50 m brede ontsluitingsweg met in het midden een vrije trambaan.

Duidelijke voorbeelden van vertakkingstructuren vormen pijpleidingnetwerken, waar de netwerkstructuur volledig is afgestemd op distributie of collectie. Omdat hier het verplaatsingspatroon volledig vast ligt, bestaat hier het nadeel van de omwegen niet. Als laatste toepassingsgebied is genoemd de situatie waarbij de omloopsnelheden zeer hoog zijn. Voorbeelden hiervan zijn hub-and-spoke systemen in de luchtvaart en telecommunicatienetwerken.



FIGUUR 1.6: GESLOTEN NETWERKEN

**Gesloten netwerken**

Bij gesloten netwerken komen in beginsel geen 'losse eindjes' voor; iedere knoop is met tenminste twee schakels met de rest van het netwerk verbonden. Bij deze netwerken worden naar de configuratie van de schakels de volgende hoofdvormen onderscheiden:

- gridvorm,
- driehoekenvorm,
- ring+ radiaalvorm



Gesloten netwerken verdienen in de volgende gevallen de voorkeur:

- Indien er sprake is van een diffuus vervoerpatroon tussen min of meer gelijkwaardige kernen;
- Wanneer op allerlei relaties sprake is van tweerichtingsverkeer.
- Indien door lagere omloopsnelheden omwegen zwaar tellen.

Gridvormige verkeersnetwerken zijn bijna altijd een afgeleide van verkavelingstructuren (bouwblokplanning). En zijn dan ook bijna altijd bewust gepland. Veel voorbeelden zijn te vinden in de Verenigde Staten; van doorslaggevende betekenis was daarbij "the land ordinance", voorgesteld door Thomas Jefferson en door het Congres in 1785 aangenomen (zie onderstaand citaat).

*"Under that ordinance a huge network of survey lines was thrown across all the land north and west of the Ohio river. The base lines and principal meridians of the survey divided the landscape into squares 36 miles each side. These in turn were subdivided into 6-mile squares or townships and further divided into 36 sections each one mile square. The mile squares are then subdivided by acreage: the quarter section 160 acres with further possible subdivisions of 80, 40, 20, 10 or 5 acres. The 5-acre sites lend themselves to further division into rectangular city blocks (not unlike those of Manhattan) and subdivision again into lots of building plots".*

Europese voorbeelden van rasterstructuren vormen de binnenstad van Bari (Italië) en de negentiende-eeuwse uitbreidingen van Barcelona. Den Haag wordt gekenmerkt door een nogal orthogonale opbouw van het wegennet.

Bij een gelijkmatige verdeling van de activiteiten over een gebied leidt een gridvormig verkeersnetwerk door de uniforme opbouw tot een gelijkmatige spreiding van de verkeersbelasting over het gehele net. Daarom bieden rasterstructuren in principe een grote mate van keuzevrijheid voor het lokaliseren van de bebouwing (activiteitenruimten).

Een nadeel van gridvormige verkeersnetwerken is het feit dat ze tot relatief grote omwegen leiden; de omweg blijft bij grid-structuren ongeacht de infrastructuurdichtheid altijd even groot. Deze omwegen zijn voor verplaatsingen op lokaal niveau minder bezwaarlijk dan voor verplaatsingen over langere afstanden. Gridvormige verkeersnetwerken zijn daarom minder geschikt voor netwerken op hogere schaalniveaus.

Indien aan een rastervormig verkeersnetwerk diagonalen toegevoegd worden, ontstaat een geheel ander beeld; deze diagonalen zijn in zeer sterke mate verkeersaantrekkend, omdat ze voor veel relaties de kortste route vormen. De verkeersaantrekkende werking van diagonalen in een rastervormig netwerk heeft vaak ook geleid tot het aantrekken van activiteiten. Een goed voorbeeld daarvan is de diagonaal Broadway in Manhattan, New York. De verkeersaantrekkende werking van diagonalen kan ook gebruikt worden om bijvoorbeeld het gebruik van bepaalde vervoerwijzen te stimuleren. Zo is in Lelystad een orthogonaal opgezet stadsdeel ontworpen (doch niet uitgevoerd) met diagonale fietsverbindingen.

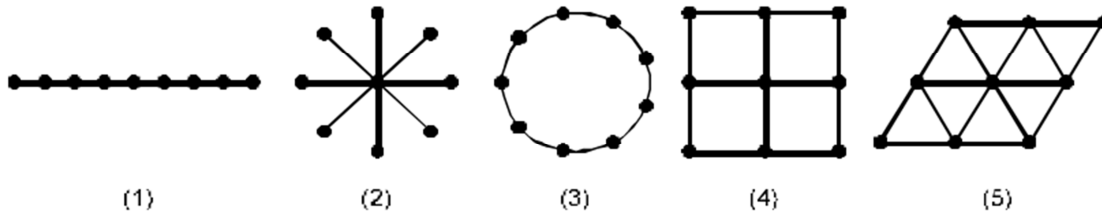
Evenals gridvormige verkeersnetwerken maken driehoekvormige verkeersnetwerken bij een diffuus verplaatsingspatroon een goede spreiding van de verkeersintensiteiten over het netwerk mogelijk. Een nadeel van dit soort netwerken op lokaal niveau is de weinig gelukkige kavelvorm. Het voordeel dat bij driehoekige netwerken de omwegen relatief kort zijn is met name gunstig voor de toepassing op hogere schaalniveaus.

Het onderling verbinden van een aantal min of meer gelijkwaardige kernen door een ringvormig verkeersnetwerk leidt tenslotte eveneens tot een gelijkmatige spreiding van de verkeersintensiteiten. Ringvormige infrastructuurnetwerken komen vooral voor op lokaal niveau.

### **Vergelijking netwerkvormen**

Een goed inzicht in de wijze van functioneren van verschillende soorten netwerken is te vinden in een studie van Bolt (1982). Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen de in Figuur 1.7 gegeven netwerkvormen. Alle vijf basis-netwerkvormen bestaan uit negen toegangspunten, verbonden door links van gelijke lengte. Overigens is de nodige terughoudendheid bij de interpretatie van de resultaten nodig. Bij de verschillende netwerken is namelijk ook steeds de configuratie van de toegangspunten, en daarmee het verplaatsingspatroon verschillend. Er worden dus niet alleen netwerkvormen met elkaar vergeleken, maar impliciet ook de bijbehorende verplaatsingspatronen.

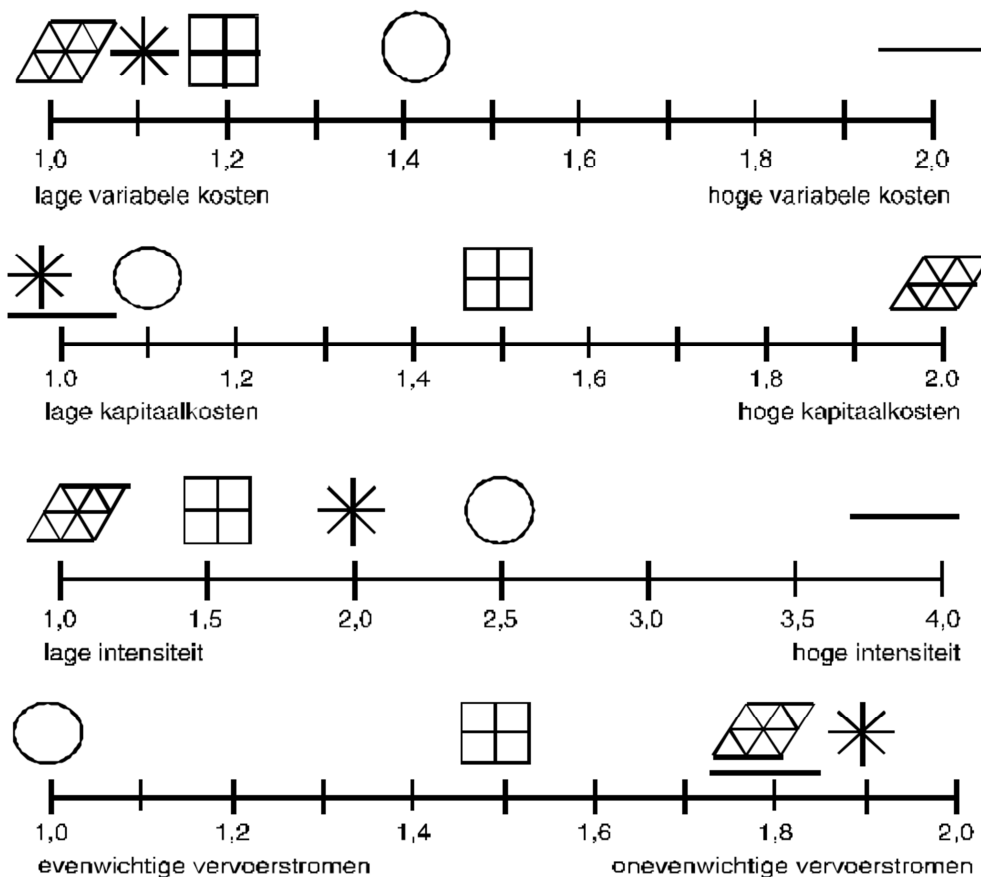
1. lineair of axiaal
2. stervormig of radiaal
3. cirkelvormig (bijzondere vorm van lineair!)
4. rechthoekig of raster,
5. driehoekig.



FIGUUR 1.7: NETWERKVORMEN (SCHAAL NIET VOOR ALLE GELIJK)

De gegeven netwerkvormen zijn met elkaar vergeleken op de volgende criteria:

1. Kapitaalkosten: verschil in weglengte.
2. Variabele verplaatsingskosten: verschil in af te leggen afstanden.
3. Verkeersintensiteit: bepaalde vormen bundelen de stromen over een beperkt aantal verbindingen, andere niet: hoe hoger de bundeling hoe hoger de maximale intensiteit
4. Verschillen in bereikbaarheid: hier wordt bedoeld het verschil in bereikbaarheid tussen de plaats met de beste en die met de slechtste bereikbaarheid.
5. Evenwichtigheid vervoerstromen (symmetrie): grote verschillen in bereikbaarheid leiden dus tot onevenwichtigheid van vervoerstromen. Deze laatste 2 criteria zijn dus aan elkaar gekoppeld.



FIGUUR 1.8: VERGELIJKING NETWERKVORMEN OP BASIS VAN VARIABELE KOSTEN, KAPITAALKOSTEN, VERVOERSINTENSITEIT EN VERSCHIL IN EVENWICHTIGHEID VERVOERSTROMEN (BEREIKBAARHEID) [BOLT, 1982]

In de (indicatieve) vergelijkingen, zoals weergegeven in Figuur 1.8, is de laagste waarde steeds op 1 gesteld. De getallen op de schaal zijn dus verhoudingsgetallen. Voorbeeld: de variabele kosten van het lineaire netwerk zijn tweemaal zo groot als die van het driehoekige netwerk. N.B. De schaal van "gebruiksintensiteit" loopt van 1 tot 4; de andere lopen van 1 tot 2. Een vergelijking van de netwerken aan de hand van de eigenschap "evenwichtigheid vervoerstromen" levert hetzelfde beeld als dat van "verschillen in bereikbaarheid" (en is daarom in dezelfde afbeelding ondergebracht).

Het blijkt dat het lineaire netwerk goedkoop is in aanleg, maar duur in gebruik (er moeten grote afstanden worden afgelegd en dat leidt tot hoge variabele kosten). Het wordt intensief gebruikt, wat bijvoorbeeld gunstig is voor een winkelstraat en ook voor de openbaarvervoerlijnen. De verschillen in bereikbaarheid zijn tamelijk groot. In het voorbeeld van de winkelstraat zijn de winkels in het midden veel gunstiger gelegen dan die aan de uiteinden.

Ook het stervormig netwerk heeft lage kapitaalkosten. Hier zijn echter ook de variabele kosten laag. De verbindingen worden redelijk intensief gebruikt. De verschillen in bereikbaarheid zijn groot: het centrum is veel beter bereikbaar dan de perifere locaties. Dit leidt tot onevenwichtige vervoerstromen en congestie in het centrum.

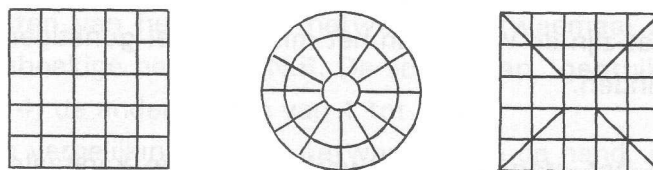
Van het ringvormige netwerk zijn de kapitaalkosten en ook de variabele kosten betrekkelijk laag. De infrastructuur wordt intensief gebruikt. Omdat er nauwelijks verschillen in bereikbaarheid zijn, zullen de vervoerstromen evenwichtig zijn. Zowel de hoge gebruiksintensiteit als de evenwichtigheid van vervoerstromen maken een ringvormig netwerk aantrekkelijk voor openbaar vervoer. Ook voor autoverkeer leidt een ringvormige structuur tot een efficiënt gebruik van de infrastructuur.

Het rechthoekige netwerk kan worden gekarakteriseerd als een "niet-extreem" netwerk. Wat betreft de meeste eigenschappen is het middelmatig tot betrekkelijk gunstig. Dit verklaart misschien de veelvuldige toepassing van dit netwerk.

Het driehoekig netwerk is kostbaar in aanleg en goedkoop voor de gebruiker en is daarmee de tegenpool van het lineaire netwerk. Het gebruik van de verbindingen is weinig intensief. De verschillen in bereikbaarheid zijn beperkt.

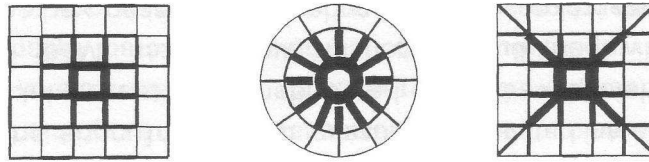
### Stedelijke netwerken

In de studie van Bolt lag de nadruk op interlokale netwerken. Een vergelijkbare interessante studie is (veel eerder) uitgevoerd door Fischer en Boudikis (1963), waarbij de nadruk lag op stedelijke netwerken.



FIGUUR 1.9: STEDELIJKE STRUCTUREN: RASTER, RADIAAL/RING EN RASTER MET DIAGONALEN (OPPERVLAKTE STAD IN ALLE DRIE GEVALLEN GELIJK, IEDER NET HEEFT 36 KNOOPPUNTEN)

Het ging hierbij ook om een studie naar de verkeerskundige effecten van ideale netwerkstructuren; onderscheid werd gemaakt tussen een rasternetwerk, een ring-radiaal netwerk en een rasternetwerk met radialen, zoals aangeven in Figuur 1.9. Daarbij werd uitgegaan van een stad waar het grootste deel van de verplaatsingen centrumgericht is. Figuur 1.10 laat zien hoe het verkeer in de onderscheiden gevallen het verkeersnetwerk belast.



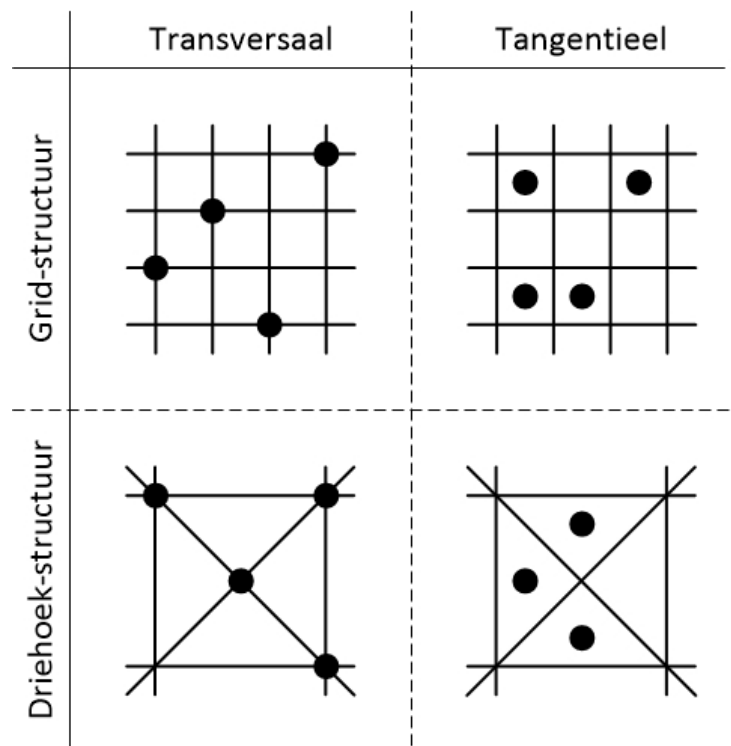
FIGUUR 1.10: TRAJECTBELASTINGEN

Vergelijking raster en raster met diagonalen: 33% van de ritten hebben voordeel van de diagonalen, voor deze 33% is de ritlengte 8 tot 30% korter; betrokken op alle ritten is dit gemiddeld 6%, diagonalen geven echter 19% meer weglengte. Vergelijking raster en ring-radiaal: in een ring-radiaal netwerk is de gemiddelde ritlengte van alle ritten 12% korter.

*Ligging infrastructuur t.o.v. bebouwd gebied*

Wat betreft de ligging van een netwerk ten opzichte van de bebouwing van een kern kan in hoofdzaak onderscheid gemaakt worden tussen de volgende in Figuur 1.11 weergegeven mogelijkheden:

- Een centrale ligging van de schakels door de kern met een centraal gelegen toegangspunt, zoals vaak het geval is bij spoorlijnen in grotere steden (wordt ook transversale ligging genoemd);
- Een tangentiële ligging van de schakels ten opzichte van de kern met perifeer gelegen toegangspunten, zoals meestal het geval is bij autosnelwegen.



FIGUUR 1.11: STRUCTUUR EN LIGGING VAN NETWERKEN

Netwerken met een centrale of transversale ligging zijn aantrekkelijk indien concentratie van vervoerstromen en vervoeractiviteiten gewenst is, indien het vervoersysteem in verhouding tot de prestatie (ritten) relatief ruimte-extensief is en indien 'functionele' knooppunten worden gecombineerd met uitwisselingspunten. Netwerken met een tangentiële ligging zijn aantrekkelijk indien het vervoersysteem relatief ruimte-intensief is en 'functionele' knooppunten niet samen hoeven te vallen met uitwisselingspunten; dit is bijvoorbeeld het geval bij het autosnelwegennet.

Bij de toepassing van randwegen voor het interlokale doorgaande verkeer zijn aanvankelijk ringwegen toegepast. Een voorbeeld hiervan is de ringweg rond Eindhoven. Later werd veel meer gestreefd naar een tangentiële ligging van autosnelwegen ten opzichte van bebouwde kernen.

Vooralsinds het begin van de jaren zestig is in West-Duitsland veel aandacht besteed aan de ontwikkeling van tangentiële opgebouwde wegennetten, teneinde de nadelen van het ring-radiaalprincipe (waarbij de radialen transversaal door de bebouwde gebieden lopen) te ondervangen. Echter ook de ontwikkeling van de Engelse New Town laat een steeds meer loslaten van het ring-radiaalprincipe zien met een pleidooi voor een hiërarchisch opgebouwd lokaal wegennet met verkeersluwe verblijfsgebieden, en goed ingebed in het interlokale wegennet.

### **Ring en tangente**

Een van de belangrijkste ontwikkelingen wat betreft de opbouw van lokale hoofdwegennetten is de overgang van ringen naar tangente. Dit is de reden nog eens nader in te gaan op het verschil tussen:

- ring-radiaal stramien: toeleidende wegen zijn op het hart van de stad of binnenstad gericht, het af te leiden doorgaande verkeer moet "haaks de hoek om",
- rechthoekig-tangentiële stramien: toeleidende wegen lopen langs de stad of binnenstad; juist het bestemmingsverkeer moet bewust afbuigen.

Let op: enerzijds kan een tangente een afgebogen radiaal zijn, anderzijds bestaan er rechthoekige 'ring'-wegen (ruit).

De omsluiting van een gebied door een ringweg of een tangente stelsel heeft veelal in de eerste plaats tot doel doorgaand verkeer, dat wil zeggen verkeer dat er geen bestemming heeft, door dat gebied te vermijden. Daarnaast is het meestal de bedoeling dat verkeer met een bestemming in het betreffende gebied zo lang mogelijk gebruik maakt van de ringweg of het tangente stelsel en pas zo laat mogelijk het gebied binnenrijdt. In beide gevallen functioneert een tangente stelsel veel beter dan een ringweg. Dit betekent ook dat een ringweg uit het oogpunt van verkeersafwikkeling meer kwaliteit moet hebben dan een tangente stelsel om zijn functie waar te kunnen maken.

Een verder nadeel van het ringwegen-radiaalstelsel is dat niet alleen meer verkeer "binnendoor" naar zijn bestemming in het betreffende gebied gaat, maar dit verkeer ook nog een vrij sterke concentratie in het midden van het gebied veroorzaakt. Dit in tegenstelling tot de goede spreiding van het bestemmingsverkeer binnen het betreffende gebied in het geval van een tangente stelsel met een orthogonale interne wegenstructuur.

Overigens zal behalve het externe bestemmingsverkeer ook het interne verkeer binnen een gebied met een ring-radiaalstelsel een veel sterkere concentratie van belastingen op wegen en knooppunten in het midden van het gebied veroorzaken dan in een gebied met een orthogonale wegenstructuur.

Het voordeel van een tangente stelsel schuilt er vooral in dat het gebruik ervan veel vanzelfsprekender is en dus niet "afgedwongen" hoeft te worden, zoals vaak bij een ringweg het geval is. In het voorgaande ging het om de tangentiële ligging van wegen voor interlokaal doorgaand verkeer. Veelal is het echter eveneens nodig binnensteden te vrijwaren van lokaal doorgaand verkeer. De hiervoor vaak toegepaste binnenstadstangenten dienen het lokale verkeer over langere afstand, dat geen bestemming in de binnenstad heeft, op te vangen en langs de binnenstad te leiden. Deze binnen(stads)tangenten geven tevens het verkeer dat wel een bestemming in de binnenstad heeft, de mogelijkheid pas op een zo laat mogelijk moment de binnenstad binnen te rijden. Dit laatste kan aangemerkt worden als de verdeelfunctie van de binnen(stads)tangenten.

Veelal zal deze verdeelfunctie zo belangrijk zijn dat de binnen(stads)tangenten alleen al nodig zijn voor de opvang en geleiding van het verkeer dat een bestemming in de binnenstad heeft, en er geen ruimte overblijft voor het lokale verkeer over langere afstand dat geen bestemming in de binnenstad heeft.

Op het moment dat de binnen(stads)tangenten te zwaar belast dreigen te raken, zal het nodig zijn niet alleen nodeloos verkeer door de binnenstad te vermijden, maar ook nodeloos verkeer langs de binnenstad. Dit betreft het verkeer tussen woonwijken onderling, tussen woonwijken en industrie- of bedrijventerreinen en dergelijke. Om te bereiken dat dit niet aan de binnenstad gebonden

verkeer ook geen gebruik van de binnen(stads)tangenten zal maken, is invoering van zogenoemde middentangenten nodig.

Een en ander betekent dat bij opbouw van een lokaal hoofdwegennet drie soorten wegen onderscheiden kunnen worden, te weten:

- binnen(stads)tangenten, vooral bedoeld voor alle verkeer met een herkomst of bestemming in de binnenstad (Delft: Westvest),
- middentangenten, vooral bedoeld voor alle verkeer met een herkomst en bestemming elders in de stad (Delft: Van Miereveltlaan),
- buitentangenten, voornamelijk bedoeld voor het interlokale doorgaande verkeer en daarom feitelijk meer deel uitmakend van het interlokale wegennet (Delft: Provinciale Weg, Kruihuisweg).

Uiteindelijk ontstaat er een orthogonaal opgebouwd lokaal hoofdwegennet met als voordelen de overzichtelijkheid, de flexibiliteit en de goede bereikbaarheid van alle stadsdelen vanuit de diverse richtingen.

### 1.3 Kengetallen

Een belangrijk kengetal van een netwerk is de lengte ervan. In Tabel 1.2 is de weglengte per wegbeheerder weergegeven. Merk op dat deze maat niet overeenkomt met de eerder gegeven functionele indeling van netwerken. Duidelijk is dat het Rijkswegennet slechts een klein deel is van het totale netwerk: 2,3%. De afgelopen jaren is de weglengte voor wegen in beheer bij het Rijk gedaald. Dit komt met name door overdracht van wegen zonder gescheiden rijbanen aan lagere overheden. Voor wegen met gescheiden rijbanen is er sprake van een groei van 2% (van 2604 km naar 2666 km). De grootste groei in het wegennet vindt plaats op het lokale niveau. Bij het Rijkswegennet is de afgelopen tijd wel veel sprake geweest van capaciteitsuitbreiding in de vorm van extra rijstroken of spitsstroken, maar dat is niet invloed op de weglengte.

Wegbeheerder	2006	2013	Aandeel	Groei
<b>Rijk</b>	3.267	3.052	2,3%	93%
<b>Provincie</b>	6.572	6.559	4,9%	100%
<b>Gemeente en Waterschap</b>	121.998	125.231	92,9%	103%
<b>Totaal</b>	<b>131.837</b>	<b>134.842</b>		<b>102%</b>

TABEL 1.2: LENGTE VAN HET WEGENNET IN 2006 EN 2013 [CBS STATLINE]

Tabel 1.3 geeft een overzicht van de infrastructuurlengte voor het spoorwegennet. 75% van het netwerk is geëlektrificeerd. Daarvan is slechts 13% enkelsporig. Bij de niet geëlektrificeerde spoorwegen is 83% enkelspoor.

	Geëlektrificeerd	Niet geëlektrificeerd	Totaal	Aandeel
<b>Enkelspoor</b>	305	617	922	31%
<b>Dubbelspoor</b>	1.711	118	1.829	61%
<b>Meersporig</b>	250	11	261	9%
<b>Totaal</b>	2.266	746	3.012	
<b>Aandeel</b>	75%	25%		

TABEL 1.3: LENGTE VAN HET SPOORWEGENNET IN 2013 [CBS STATLINE]

Een tweede kengetal, bijvoorbeeld geschikt voor internationale vergelijkingen, is de netwerkdichtheid: netwerklengte gedeeld door het oppervlak. Tabel 1.4 toont de dichtheden voor een drietal netwerksoorten in Nederland. Opvallend is dat de dichtheden voor de hoofdinfrastructuur minder verschillen dan die voor de totale infrastructuur.

<b>Netwerk</b>	<b>Netwerkdeel</b>	<b>Dichtheid [km/km<sup>2</sup>]</b>
<b>Wegen</b>	Totaal	4,099
	Hoofdinfrastructuur (rijkswegen, gescheiden hoofdrijbanen)	0,079
<b>Spoorwegen</b>	Totaal	0,089
	Hoofdinfrastructuur (twee- of meersporig, geëlektrificeerd)	0,058
<b>Vaarwegen</b>	Totaal	0,185
	Hoofdinfrastructuur (rijksvaarwegen)	0,075

TABEL 1.4: NETWERKDICHTHEDEN IN NEDERLAND 2013 [CBS STATLINE]

Op basis van het totaal kilometrage van autobestuurders (OVIN) en het voertuigkilometrage op rijkswegen (Rijkswaterstaat) is een schatting te maken van de mate waarin de verplaatsingen op het autosnelwegennet worden gebundeld: Op 2,3% van de wegenlengte wordt meer dan 50% van het autokilometrage afgewikkeld!

## 2 NETWERKONTWERP

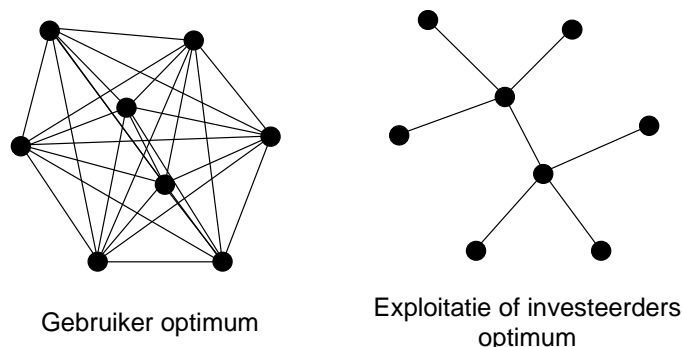
### 2.1 Het ontwerpen van een verkeersnetwerk

#### *Complexiteit*

Het kernprobleem bij netwerkontwerp is het zoeken naar een netwerk dat zo goed mogelijk voldoet aan bepaalde doelstellingen. Aan de ene kant zijn er beslissingsvariabelen die bepalend zijn voor het netwerk, bijvoorbeeld schakels, lijnen, capaciteiten of frequenties, en aan de andere kant een doelstelling waarmee het netwerk wordt beoordeeld. Daarnaast kan er sprake zijn van specifieke randvoorwaarden zijn waaraan moet worden voldaan.

Op het eerste oog lijkt dit simpel. Het netwerkontwerpprobleem staat echter bekend als een lastig probleem. Een karakteristiek dat het probleem ingewikkeld maakt is de combinatoriek. Als de beslissingsvariabele eenvoudig beperkt blijft tot het wel of niet opnemen van een schakel in een netwerk, wordt het aantal mogelijke oplossingen al snel erg groot. Een voorbeeld. Bij 4 knooppunten zijn in principe 6 schakels mogelijk. Om alle knooppunten met elkaar te verbinden zijn minimaal 3 schakels noodzakelijk. Het aantal mogelijke combinaties van 3, 4, 5, en 6 schakels bedraagt 42. Bij 6 knooppunten wordt het aantal mogelijke schakels al 15 en het aantal netwerken meer dan 30.000. Het aantal mogelijke oplossingen wordt dus al snel erg groot. Het zal duidelijk zijn dat als de beslissingsvariabelen meer waarden kan aannemen dan wel/niet in het netwerk opnemen, zoals bij capaciteiten, het aantal mogelijkheden nog groter wordt. Bij openbaar vervoernetwerken komt daarbij nog het feit dat bij elk mogelijk schakelnetwerk weer heel veel lijnennetwerken mogelijk zijn.

Naast de combinatoriek zijn er nog twee aspecten die het netwerkontwerp-probleem complex maken. De eerste volgt uit de verschillende partijen die met het netwerk te maken hebben, met name de gebruiker versus de investeerder of exploitant (Figuur 2.1). Vanuit de optiek van de reiziger is het feitelijk simpel: een goed netwerk heeft directe verbindingen tussen elke herkomst en bestemming. En als het om openbaar vervoer gaat, graag met een hoge frequentie. De investeerder en exploitant, aan de andere kant, willen het netwerk graag zo klein mogelijk houden, oftewel zo min mogelijk schakels of lijnen en met zo laag mogelijke frequentie.



FIGUUR 2.1: VERSCHIL TUSSEN OPTIMUM VOOR GEBRUIKERS EN VOOR EXPLOITANTEN OF INVESTEERDERS

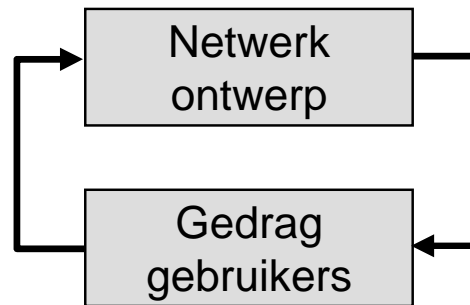
Dit is natuurlijk een zwart-wit beeld, maar het illustreert duidelijk dat het gaat om een balans tussen beide optieken. De sleutel hiervoor zit in de doelstelling die voor het netwerkontwerp wordt gebruikt, eventueel in combinatie met randvoorwaarden. Hiervoor kunnen drie mogelijkheden worden onderscheiden:

1. De doelstellingsfunctie brengt de belangen van beide partijen in balans, bijvoorbeeld gebaseerd op economische principes als welvaartsmaximalisatie of minimalisatie totale kosten.
2. De doelstellingsfunctie heeft betrekking op één partij, meestal de gebruiker, en de belangen van de andere partij komen naar voren in de randvoorwaarden. Een voorbeeld hiervan is het minimaliseren van reistijden bij een gegeven budget.



3. De derde mogelijkheid richt zich ook op één partij maar houdt tegelijkertijd rekening met de reacties van de andere partij. Een typisch voorbeeld is winstmaximalisatie waarbij (natuurlijk) rekening wordt gehouden met de invloed van het netwerk op het gebruik van het netwerk.

Bij deze laatste optie is het tweede aspect dat bijdraagt aan de complexiteit al enigszins beschreven: de sterke afhankelijkheid tussen het netwerk en het netwerkgebruik. Vaak wordt het netwerkontwerpprobleem beschreven als een Stackelberg-spel, waarin sprake is van een beslisser, de netwerkontwerper, die volledige kennis heeft over het gedrag van de andere partij in het spel, de gebruikers, en deze kennis ook gebruikt om zijn doelstellingen te bereiken (Figuur 2.2).



FIGUUR 2.2: HET NETWERKONTWERP-PROBLEEM ALS EEN STACKELBERG-SPEL

In zo'n Stackelberg spel zijn twee problemen te onderscheiden. Het bovenste probleem betreft het netwerkontwerp zelf. Het zogenaamde onderste probleem gaat over de manier waarop de gebruikers reageren op een ontworpen netwerk. Leidt dat tot meer gebruik of tot minder, en welke routes worden wel en niet gebruikt? Zo'n spel kan worden gezien als een iteratief proces waarin de beslisser het netwerk wijzigt en kijkt hoe de gebruikers reageren en aan de hand daarvan het netwerk verder aanpast. Het netwerk is dus afhankelijk van het gebruik maar het gebruik hangt weer af van het netwerk. Een soort kip-ei probleem dus. Het onderste probleem kan erg complex zijn. In feite is dat de gehele cirkel van Wegener zoals die in het vorige deel is besproken! En als het ontwerpprobleem met een optimalisatiemodel wordt aangepakt, is het onderste probleem eigenlijk het 4-fasen model!

Om deze laatste complexiteit te reduceren wordt vaak een aantal beperkingen gebruikt bij de beschrijving van het gedrag van de gebruikers:

1. Het aantal gebruikers blijft constant. Er wordt dan verondersteld dat het gebruik primair afhankelijk is van bijvoorbeeld de ruimtelijke structuur of dat de gebruikers geen alternatieven hebben;
2. De capaciteit heeft geen invloed op het gebruik. Hierbij is de veronderstelling dat of het gebruik van het netwerk nergens tot capaciteitsproblemen leidt of dat te allen tijde voor voldoende capaciteit wordt gezorgd.

Beide vereenvoudigingen maken het netwerkontwerpprobleem hanteerbaarder. Het is echter wel belangrijk te controleren of ze achteraf gezien nog steeds acceptabel zijn.

#### Probleemtypen

Ten slotte zijn er bij netwerkontwerp twee typen ontwerpproblemen te onderscheiden

1. Nieuwe netwerk. Gegeven een verzameling van toegangspunten wordt een nieuw netwerk ontworpen. Gevaar hierbij is dat het nieuwe netwerk sterk afwijkt van wat al bestaat. Dit speelt vooral bij verkeersnetwerken en in mindere mate bij vervoerdienstnetwerken;
2. Verbeteren bestaand netwerk. Hierbij gaat het om uitbreidingen van het netwerk, schakels en capaciteiten. Risico hierbij is dat zwakke plekken in het huidige netwerk als uitgangspunt worden gehanteerd.

In de praktijk zal vooral het tweede type relevant zijn. Grote veranderingen die een geheel nieuw ontwerp tot gevolg heeft zijn toch niet mogelijk, denkt men. Toch is het zinnig zo nu en dan ook het netwerk als een geheel te ontwerpen. Op die manier wordt duidelijk gemaakt waar de structurele knelpunten in het netwerk zitten.

## 2.2 Ontwerpdilemma's

In het hoofdstuk over netwerken zijn diverse netwerkkenmerken belicht. Wanneer er een ontwerp gemaakt wordt, dan worden aan deze 'ontwerpvariabelen' waarden toegekend. Hierbij treden echter ontwerpdilemma's op: factoren die elkaar tegenwerken waardoor een optimaal netwerk niet eenvoudig kan worden bepaald. Door het maken van een ontwerp wordt een bepaalde positie in de ontwerpdilemma's ingenomen.

In Tabel 2.1 staat een geordende set van ontwerpdilemma's weergegeven. De ordening van de ontwerpdilemma's houdt in, dat een keuze in elk ontwerpdilemma in principe als randvoorwaarde dient voor het volgende ontwerpdilemma. De dilemma's moeten dus in beginsel in de aangegeven volgorde worden afgewerkt (waarbij uiteraard terugkoppelingen mogelijk zijn). Deze dilemma's gelden voor het gehele personenvervoersysteem, dus zowel individueel als collectief, en voor alle schaalniveaus.

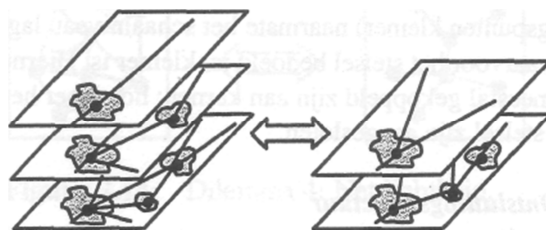
Dilemma	Tegenstrijdige variabelen	
<b>1 Aantal stelsels</b>	Functionele differentiatie	Kostenbesparing
<b>2 Toegangsduichtheid</b>	Verbindingskwaliteit	Toegankelijkheid
<b>3 Ontsluitingsstructuur</b>	Toegankelijkheid	Differentiatie in gebruik
<b>4 Netdichtheid</b>	Verbindingskwaliteit	Kostenbesparing
<b>5 Realiteitswaarde</b>	Optimalisatie kwaliteit	Kostenbesparing

TABEL 2.1: OVERZICHT ONTWERPDILEMMA'S [EGETER ET AL., 2002]

Onderstaand worden deze dilemma's kort toegelicht.

### Dilemma 1: Aantal stelsels

Het totale vervoeraanbod wordt opgebouwd uit een aantal stelsels, waarbij elk stelsel gekenmerkt wordt door organisatievorm (individueel, collectief) en schaalniveau (snelheden, afstandsklassen). De achtergrond hiervan is, dat door een onderverdeling in stelsels het vervoeraanbod beter kan worden afgestemd op de verschillende functies die het moet vervullen. Hoe meer stelsels, hoe beter elk stelsel kan worden toegesneden op een functie, anders gezegd: hoe meer functionele differentiatie in het vervoeraanbod. Daar staat tegenover dat minder stelsels vaak leiden tot kostenbesparing, doordat de beschikbare capaciteit efficiënter wordt gebruikt.



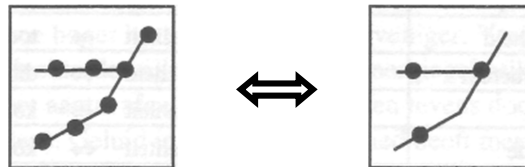
FIGUUR 2.3: DILEMMA 1: AANTAL STELSELS

Een voorbeeld van dit dilemma is het zgn. drietreinensysteem: de opdeling van treindiensten in drie schaalniveaus: intercity, sneltrein en stoptrein. De achtergrond hiervan is dat reizigers met verschillende verplaatsingsafstanden toch een passend treinproduct krijgen geboden. Uit kostenbesparingsoverwegingen zou een homogeen treinproduct echter de voorkeur hebben: men heeft dan minder treinen nodig om een aantrekkelijke frequentie te kunnen bieden, en minder infrastructuur (bijvoorbeeld geen viersporigheid) om de treindiensten te kunnen afwickelen. Overeenkomstige voorbeelden zijn ook te vinden voor individueel vervoer (korte- en langeafstandsverkeer over dezelfde weg, of het ontvlechten tot twee verschillende wegen).

Veelal zal het zo zijn dat het aantal schaalniveaus in het vervoersysteem groter kan zijn, naarmate de verstedelijkingsgraad groter is. Zo zal men in de Randstad eerder toe overgaan het wegennet te ontvlechten dan in Oost-Groningen.

**Dilemma 2: Toegangs-dichtheid**

Binnen een stelsel bestaat het dilemma tussen veel of weinig toegangspunten. Hoe meer toegangspunten een stelsel heeft, hoe beter de *toegankelijkheid* van dat stelsel is, en dus hoe minder voor- en natransport over onderliggende (dus langzamere) stelsels nodig is. Daar staat tegenover dat de *verbindingskwaliteit* over het stelsel (dus: hoe snel, betrouwbaar en gemakkelijk kom ik van het ene naar het andere toegangspunt) gediend is bij zo weinig mogelijk toegangspunten.



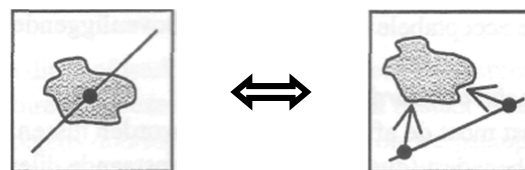
FIGUUR 2.4: DILEMMA 2: TOEGANGSDICHTHEID

Dit dilemma speelt een dominante rol binnen het openbaarvervoersysteem, omdat bij (bijna) ieder toegangspunt (halte of station) gestopt moet worden. Dit is bijvoorbeeld de achtergrond van het onderscheid tussen stop- en sneltreinen. Maar ook bij het individuele vervoersysteem speelt dit dilemma een rol: een autosnelweg met veel op- en afritten heeft een relatief lage verbindingkwaliteit, doordat zo'n snelweg veel gebruikt zal worden door regionaal en lokaal verkeer. Ook leidt elke op- en afrit tot turbulenties in de verkeersstroom.

In het algemeen is het zo dat de toegangs-dichtheid groter zal zijn (ofwel de afstand tussen de toegangspunten kleiner) naarmate het schaalniveau lager is, en dus de verplaatsingsafstand waarvoor het stelsel bedoeld is, kleiner is. Hiermee hangt samen dat toegangspunten meestal gekoppeld zijn aan kernen; hoe lager het schaalniveau, hoe meer kernen op het stelsel zijn aangesloten.

**Dilemma 3: Ontsluitingsstructuur**

Naast het vaststellen van het aantal toegangspunten, speelt ook de vraag naar de ontsluitingsstructuur van de kern: legt men een toegangspunt in het midden (zoals meestal bij de trein gebeurt) of plaatst men de toegangspunten aan de rand van de kern (zoals meestal bij het wegennet gebeurt), en wat moet dan de afstand tot het centrum zijn. Het plaatsen van het toegangspunt midden in het stedelijk gebied maximaliseert de *toegankelijkheid*. Het leidt er echter ook toe, dat een stelsel aantrekkelijk wordt voor verplaatsingsafstanden die lager zijn dan waarvoor het stelsel bedoeld is: de beoogde *differentiatie in het gebruik*. De grondslag voor het onderscheiden van verschillende stelsels, neemt af. Daarnaast leidt een ontsluitingsstructuur die penetreert in het stedelijk gebied vaak tot hogere kosten en meer omgevingshinder.



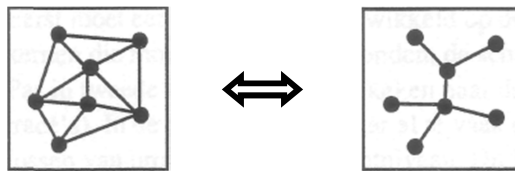
FIGUUR 2.5: DILEMMA 3: ONTSLUITINGSSTRUCTUUR

Hoewel dit dilemma in principe zowel speelt voor collectief als voor individueel vervoer, is de uitkomst voor beide typen stelsels verschillend:

- Bij *collectief vervoer* liggen de toegangspunten bij voorkeur midden in het stedelijk gebied. De voornaamste reden hiervan is dat iedere overgang tussen stelsels (dus ook voor- en natransport) altijd de noodzaak heeft tot een fysieke transfer (het wisselen van voertuig) met de bijbehorende ongemakken. Anderzijds leidt het centraal ontsluiten van kernen bij openbaar vervoer tot minder hinder dan bij het individueel vervoer.
- Bij *individueel vervoer* liggen de toegangspunten bij voorkeur op enige afstand van de kern. De overgang op het onderliggende wegennet verloopt vrijwel weerstandsloos, en de hinder van wegontsluitingen in stedelijk gebied is relatief groot. Op deze manier wordt ook 'ongewenst' gebruik van wegen over te korte afstanden voorkomen.

**Dilemma 4: Netdichtheid**

Als eenmaal bekend is welke kernen een stelsel moet verbinden, dan blijft nog de vraag of deze kernen met veel of met weinig directe schakels verbonden moeten worden. Hoe meer schakels, hoe beter de *verbindingskwaliteit*: de omwegfactoren zijn kleiner. Echter, bij openbaar vervoer maakt bundeling op een gering aantal schakels hogere frequenties mogelijk. Uit oogpunt van *kostenbesparing* is ook een zo laag mogelijke netdichtheid gewenst. Kostenbesparing wordt hier overigens niet alleen in financiële zin opgevat: ook het minimaliseren van de aantasting van natuur en leefomgeving vallen eronder.



FIGUUR 2.6: DILEMMA 4: NETDICHTHEID.

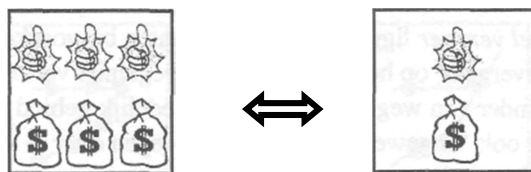
Dit dilemma speelt in gelijke mate bij individueel en collectief vervoer. Wat echter wel een belangrijke rol speelt, is de aanwezige infrastructuur in de uitgangssituatie. Aanleg van nieuwe infrastructuur is een kostbare zaak. Dit geldt in mindere mate als volstaan kan worden met functieverandering van bestaande infrastructuur.

De acceptabele netdichtheid hangt primair samen met twee factoren:

- de totale hoeveelheid vervoer: hoe groter de vervoerstromen in een gebied zijn, hoe eerder het acceptabel is om extra infrastructuur aan te leggen, en
- de kwaliteitsverhouding tussen het beschouwde stelsel en het onderliggende stelsel: hoe meer verschil in kwaliteit er is tussen de schaalniveaus in het vervoersysteem, hoe groter de acceptabele omweg over het bovenliggende stelsel is.

**Dilemma 5: Realiteitswaarde**

Last but not least moet de afweging gemaakt worden tussen een netwerkontwerp dat het ideale netwerk benadert (dus waar in alle bovenstaande dilemma's de 'optimale' keuze wordt gemaakt), en een minder ideaal, maar wel realistischer en haalbaarder netwerk. Het verschil tussen beide zit hem vooral in de kosten van nieuwe infrastructuur. Het kan echter ook een verschil in tijdshorizon zijn: op korte termijn zal men in het algemeen de voorkeur geven aan relatief kleine, en dus realistische en haalbare ingrepen in een netwerk. Deze dienen echter geplaatst te zijn in een langetermijnperspectief dat meer in de richting gaat van een ideale structuur (waar ook de ontwikkeling van de ruimtelijke structuur aan gekoppeld dient te zijn). Het ontbreken van zo'n langetermijnvisie leidt tot een onsamenhangende, vraagvolgende knelpuntenaanpak en biedt weinig aanknopingspunten tot een sturend infrastructuurbeleid.



FIGUUR 2.7: DILEMMA 5: REALITEITSWAARDE

**2.3 Bundeling en hiërarchie**

In het voorgaande is gesteld dat een gegeven aantal kernen door diverse, verschillend opgebouwde netwerken onderling verbonden kunnen worden. Veel lokale en regionale wegennetten zijn oorspronkelijk niet bewust gepland, maar in de loop van de tijd gegroeid. Daarnaast bestaat een groot aantal stedelijke netwerken dat wel bewust gepland is. Het zijn echter lang niet altijd vervoerkundige gronden die aan de opzet van zo'n netwerk ten grondslag liggen. Zo waren het in bepaalde gevallen militaire overwegingen die de vorm van de uitbouw van een stratennet bepaalden, in andere gevallen het streven naar een efficiënte verkaveling. Een en ander

maakt het nodig aandacht te schenken aan de specifieke ontwerpcriteria die de vervoerfunctie aan het ontwerp en de uitbouw van netwerken stelt.

Zoals eerder gezegd, heeft een bepaald netwerk nagenoeg altijd een verbindende en een ontsluitende functie. Voor de gebruiker zijn de verplaatsingstijden tussen herkomst en bestemming en de via het netwerk af te leggen afstanden relevant. Vanuit de optiek van de individuele gebruiker dienen, in het bijzonder, ten aanzien van de beperking van de omwegen eisen gesteld te worden. De acceptabele omwegfactor kan echter afhankelijk gesteld worden van de te bedienen soort relatie.

Voorts zal gestreefd moeten worden naar een zodanige opzet van het netwerk dat alle relevante vervoerrelaties op een zo efficiënt mogelijke wijze verwerkt kunnen worden. Dit leidt tot twee criteria, te weten:

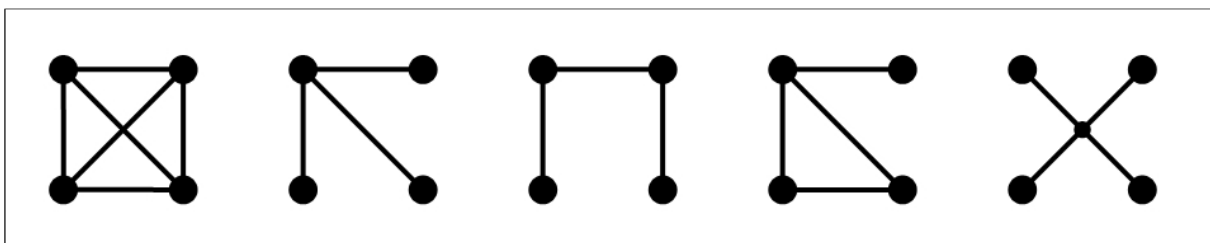
- vanuit het belang van de exploitant van het netwerk dient te worden gestreefd naar een zo beperkt mogelijke totale netwerk lengte,
- vanuit het belang van de totale populatie van gebruikers van het netwerk moet gestreefd worden naar een zodanige opzet dat het totale aantal voertuigkilometers geminimaliseerd wordt.

Het zal duidelijk zijn dat deze twee criteria niet automatisch tot een zelfde opzet van een netwerk leiden. De uiteindelijke keuze zal daarom afhankelijk zijn van het belang dat aan het ene dan wel het andere criterium gehecht wordt. Naast de belangen van de exploitant en de gebruikers van een infrastructuurnetwerk spelen ook de belangen van de omgeving een steeds belangrijker rol. Enerzijds gaat het daarbij om het beperken van de directe plaats- of tijdgebonden negatieve effecten van de aanwezigheid van infrastructuur en het optreden van verkeersintensiteiten, zoals ruimtebeslag en geluidshinder. Anderzijds gaat het om niet direct plaats- en tijdgebonden effecten, die samenhangen met het totaal aantal voertuigkilometers, zoals diverse vormen van luchtvervuiling.

**Bundeling**

Zoals gesteld is verkeersinfrastructuur bedoeld om het verplaatsen van mensen en goederen mogelijk te maken. In het algemeen zal echter niet voor iedere verplaatsing een nieuw pad gemaakt worden, doch zal in eerste instantie getracht worden reeds gebaande paden te gebruiken. Zelfs olifanten doen dat. Zo dienen ook verschillende nederzettingen (kernen van activiteiten) onderling zo efficiënt mogelijk verbonden te worden. Het zou weliswaar denkbaar zijn een gegeven aantal kernen allemaal paarsgewijs te verbinden. Veel beter is het echter te streven naar een zodanig netwerk van schakels en knooppunten dat zo veel mogelijk verkeer op zo min mogelijk wegen afgewikkeld wordt. De hierdoor mogelijke bundeling van verkeer biedt belangrijke (efficiency)voordelen voor zowel de wegbeheerder en de weggebruiker als voor de omgeving.

Zoals Figuur 2.8 laat zien, kunnen de vier punten op verschillende manieren met elkaar verbonden worden. Het meest direct zijn deze vier punten via zes verbindingen met elkaar verbonden. Maar het kan echter ook met minder verbindingen. Per saldo zijn twee verbindingen voldoende. Het netwerk bestaat dan uit vier schakels en een knooppunt.



FIGUUR 2.8: VERSCHILLENDE MOGELIJKHEDEN OM VIER KERNEN TE VERBINDEN

Algemeen geldt dat het streven naar bundeling van verkeersstromen een van de belangrijkste principes bij de opzet van netwerken is. Aan de ene kant leidt bundeling weliswaar tot nadelen vanwege verlies aan directheid: er ontstaan omwegen (althans gerekend in kilometers). De voordelen die het gevolg zijn van de schaalvergroting, die bundeling mogelijk maakt, wegen echter veelal ruimschoots op tegen het nadeel van de omwegen.

Deze schaalvergroting betekent dat voor dezelfde of zelfs lagere kosten (zowel voor wegbeheerder/overheid als voor gebruiker) kwalitatief betere verkeersvoorzieningen mogelijk zijn. De schaalvoordelen zijn een gevolg van onder meer:

- een betere capaciteitsbenutting: bij een zelfde totale capaciteit geeft bundeling van verkeersstromen een hogere benutting en daardoor lagere kosten (door vereffening van fluctuaties van de vervoervraag in ruimte en tijd);
- een efficiëntere technologie: bij zwaardere vervoerstromen wordt inzet van andere technologie met een hogere productiviteit en daardoor lagere kosten per eenheid (en veelal ook hogere kwaliteit, gemeten in snelheid en veiligheid) betaalbaar: autosnelweg in plaats van gewone weg; trein in plaats van bus;
- minder milieuschade: minder ruimtebeslag, landschapsversnippering, geluidhinder (de som van twee vervoerstromen geeft altijd minder geluidhinder dan de twee afzonderlijk).

Uitdrukkelijk is gesproken over bundeling van verkeer. Bij particulier autoverkeer is dit de concentratie van zoveel mogelijk voertuigen op zo weinig mogelijk wegen. Bij het collectief (openbaar) vervoer is er ook sprake van zoveel mogelijk reizigers in zo weinig mogelijk voertuigen. In het bijzonder bij openbaar vervoer is een verregaande wijze van bundeling mogelijk bij de inzet van railsystemen, zoals metro en trein.

Wordt de bundeling nog verder doorgevoerd dan ontstaat een hiërarchische structuur zoals eerder beschreven. Hoe hoger in hiërarchie, hoe sterker de bundeling: door dit schaaffect kan op hogere hiërarchische niveaus een hoogwaardiger technologie worden toegepast. Daarbij zullen netwerken op hogere hiërarchische functionele niveaus doorgaans een grotere maaswijdte hebben. Om de netwerken op de hogere niveaus te kunnen 'vullen', zijn de lagere hiërarchische niveaus onontbeerlijk. In open netwerken zit de hiërarchie besloten in de netwerkstructuur: er is binnen het netwerk sprake van een hiërarchische opvolging van knooppunten. Bij gesloten netwerken is een hiërarchische opbouw mogelijk door netten van verschillende schaalniveaus aan elkaar te koppelen ('in elkaar te hangen'). Bovendien kunnen open en gesloten netwerken, die een functie hebben op verschillende schaalniveaus, aan elkaar worden gekoppeld.

## 2.4 Uitbouw van netwerken

Bij de verdere uitbouw van vervoernetwerken kan onderscheid gemaakt worden tussen de volgende mogelijkheden:

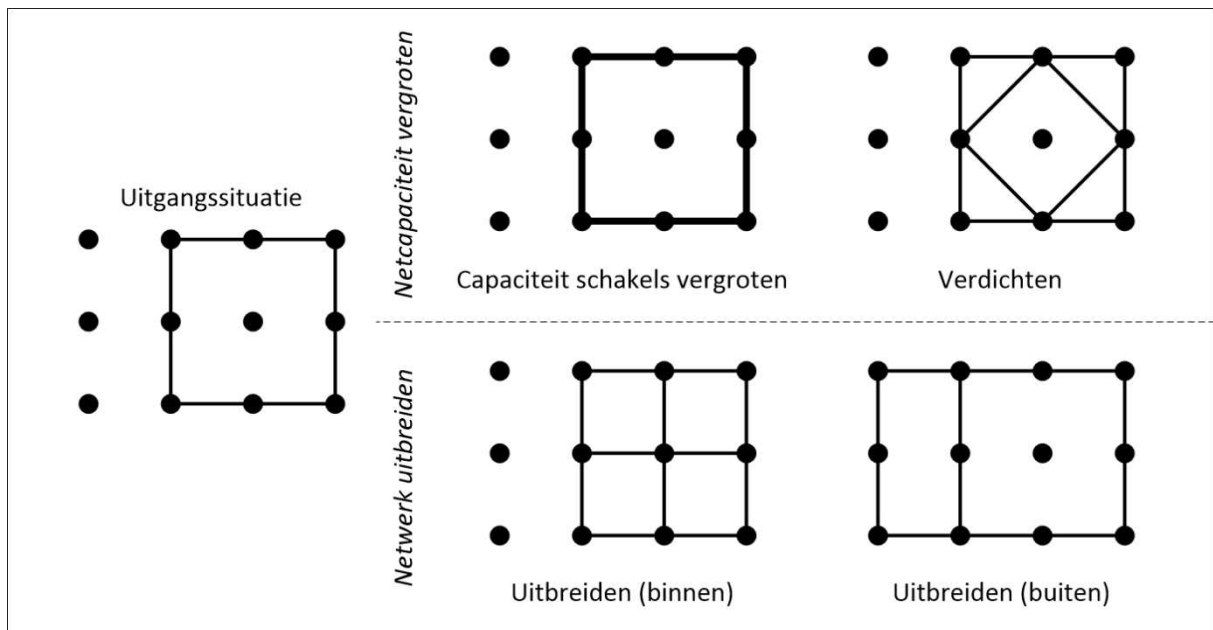
- vergroten bedieningsgebied netwerk (uitbreiden);
- verdichten netwerk (inbreiden);
- netwerkcapaciteit vergroten;
- netwerk robuuster maken.

### **Vergroten bedieningsgebied netwerken**

Het vergroten van het bedieningsgebied van netwerken is gericht op het aansluiten en/of verbinden van nieuwe gebieden en kernen en het faciliteren van lange-afstandverplaatsingen.

De betekenis van de nationale hoofdinfrastructuur kan worden vergroot door deze naadloos te laten aansluiten bij die van de buurlanden opdat het nationale netwerk een integraal onderdeel van de Europese netten wordt. Mede onder invloed van de Europese Unie wordt toegewerkt naar sluitende netwerken op Europese schaal. Bij de wegeninfrastructuur is de integratie tussen de nationale netten vrijwel afgerond.

Wat betreft de Europese rail-hoofdinfrastructuur is de uitbreiding van het TGV-net in noord-zuidrichting nagenoeg gereed. Daarnaast worden voorzieningen getroffen voor de oost-westverbinding (Amsterdam-Keulen). Er is tot op heden relatief weinig aandacht voor een verbinding in noordoostelijke richting (Hamburg, Berlijn, Scandinavië), met uitzondering van de recent afgesloten discussie over de Zuiderzeelijn. Toch zou deze verbinding interessant kunnen zijn: Nederland wordt in dat geval nog beter geïntegreerd in het internationale net van hogesnelheidslijnen.



FIGUUR 2.9: ONTWIKKELING VAN NETWERKEN

Voor het goederenvervoer is de Betuwelijn (verbinding Rijnmond - Zevenaar - Ruhrgebied) recent gerealiseerd, maar is er weinig aandacht voor de verbindingen met België en Frankrijk. Bij de besluitvorming rond de Betuwelijn is er overigens maar weinig aandacht geschonken aan de internationale netwerkvorming: België streeft er naar om de IJzeren Rijn (Antwerpen - Ruhrgebied via Roermond) in gebruik te nemen.

**Verdichten netwerk**

Het verdichten van netwerken is gericht op het verkorten van omwegen en het bieden van alternatieve routes. Verdichting van netwerken leidt indirect ook tot een toename van de netwerkcapaciteit.

**Netwerkcapaciteit vergroten**

De netwerkcapaciteit kan worden vergroot door de schakelcapaciteit te vergroten of door nieuwe, parallelle, schakels aan te leggen. Vergroting van de netwerkcapaciteit kan nodig zijn vanwege een toename van de verkeersstromen, vanwege hogere kwaliteitseisen (afwikkelingsniveau) of hogere veiligheidseisen. Hieronder zijn voor weg, rail en binnenvaartinfrastructuur mogelijke netwerkcapaciteit vergrotende maatregelen genoemd.

Vooral ten noorden van Rotterdam en rond Amsterdam zijn er omvangrijke aanpassingen van de hoofdwegeninfrastructuur gepland. Hier wordt de netwerkcapaciteit vergroot door parallelle wegen (en tunnels) aan te leggen. In de huidige plannen blijft de capaciteit van de railinfrastructuur op de verbinding Rijswijk-Delft Zuid onder het niveau van de overige trajectgedeelten tussen Rotterdam en Den Haag. Om de netwerkcapaciteit op peil te brengen, zou kunnen worden gekozen voor het toch viersporig maken van het baanvak.

De capaciteit van het totale vervoersysteem kan ook worden vergroot door verschillende netwerken (goed of beter) aan elkaar te koppelen.

**Robuustheid netwerk vergroten**

De robuustheid van een netwerk kan verhoogd worden door de capaciteit van kwetsbare schakels te vergroten, door alternatieve routes binnen een netwerk beschikbaar te houden of door het gebruik van alternatieve netwerken (alternatieve vervoersystemen) mogelijk te maken. Door de aanleg van alternatieve verbindingen ontstaan meer keuzemogelijkheden (binnen een zelfde of tussen alternatieve netwerken): de afhankelijkheid van een bepaalde verbinding neemt daardoor af, waardoor de robuustheid van het netwerk toeneemt.

Op de autosnelweg relatie Den Haag/Rotterdam - Amsterdam is er echter sprake van een enkelvoudige (maar in capaciteit inmiddels vergrote) verbinding. In het kader van een vergroting van de robuustheid zou hier een parallelle verbinding kunnen worden gebouwd, maar is het ook mogelijk goede overstapmogelijkheden naar de spoorwegen te bouwen: binnen dat netwerk zijn immers wel parallelle verbindingen beschikbaar. Een derde oeververbinding in Rotterdam zou, wat betreft de robuustheid van het netwerk, aanbeveling verdienen.

Een 'parallelle' spoorverbinding Zwolle - Meppel en eventueel een verbinding over de Afsluitdijk zullen de robuustheid van het railsysteem kunnen verhogen: nu 'hangt' het hele noordelijke spoorwegennet aan de verbinding Zwolle-Meppel. Geredeneerd vanuit de Randstad is de spoorrelatie met het zuiden kwetsbaar, vanwege het relatief beperkte aantal oeververbindingen. Op den duur zou een extra verbinding hier aanbevelenswaardig zijn of zouden er alternatieven gezocht moeten worden in speciale, hoogwaardige, busverbindingen.



### 3 ONTWERPMETHODIEK VOOR REGIONALE NETWERKEN

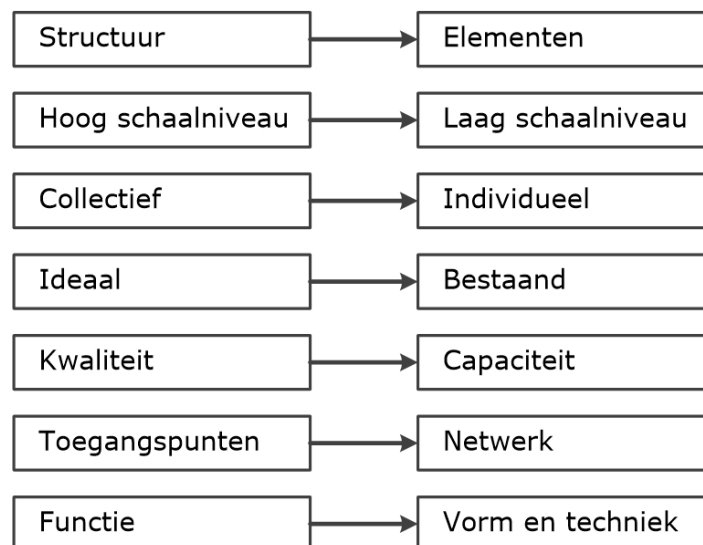
#### 3.1 Inleiding ontwerpmethodiek voor regionale netwerken

Het voorgaande hoofdstuk behandelde de kenmerken van infrastructuurnetwerken en de theorie van het netwerkontwerpprobleem. In dit hoofdstuk wordt een door TNO ontwikkelde ontwerpmethodiek besproken waarmee een nieuw integraal regionaal vervoersysteem kan worden opgezet, maar waarmee ook bestaande netwerken kunnen worden geoptimaliseerd (Egeter et al., 2002). De methodiek wordt aan de hand van een voorbeeldcase uitgewerkt.

De ontwerpmethodiek bestaat uit een aantal ontwerpstappen die achtereenvolgens doorlopen worden. Deze ontwerpstappen zijn gebaseerd op de ontwerpdilemma's die in het vorige hoofdstuk beschreven zijn. Om daar in het ontwerpproces mee om te gaan is een aantal vuistregels opgesteld, dat voor ieder schaalniveau waarop ontworpen wordt aanbevelingen doet over het invullen van de belangrijkste kenmerken van de beoogde vervoersystemen. Eerst gaat dit hoofdstuk echter in op de uitgangspunten van de methodiek en de schaalniveaus waarvoor de methodiek bedoeld is.

#### 3.2 Uitgangspunten ontwerpmethodiek

De ontwerpmethodiek heeft een aantal belangrijke uitgangspunten die vermeld staan in Figuur 3.1.



FIGUUR 3.1: UITGANGSPUNTEN ONTWERPMETHODIEK

##### **Eerst structuur, dan elementen**

Eerst moet een visie worden ontwikkeld op de totaalstructuur van het netwerk, zoals de kernen die moeten worden verbonden, de schaalniveaus die worden onderscheiden, etc. Pas in tweede instantie wordt gekeken naar de elementen (wegvakken, knooppunten, tracés). In de praktijk wordt maar al te vaak een knelpuntenbenadering toegepast: oplossen van problemen op elementniveau. Dit leidt tot een vraagvolgende aanpak die weinig mogelijkheden biedt voor een ruimtelijk structurerend beleid.

**Eerst hoog schaalniveau, dan laag schaalniveau**

Elk netwerk wordt afzonderlijk ontworpen, waarbij primair topdown wordt gewerkt: van hoog naar laag schaalniveau, met een terugkoppeling bottom-up. Alleen op deze manier is samenhang tussen de netwerken op verschillende schaalniveaus te krijgen. Als gestart wordt met het lokale of regionale netwerk, is het moeilijk nog een kwalitatief goed nationaal netwerk in te passen. De praktijk leert, dat het ontwerpproces vaak op een te laag schaalniveau wordt ingestoken, veelal gedictieerd door bestuurlijke grenzen.

**Eerst collectief, dan individueel**

De locatie van toegangspunten van het collectieve systeem (haltes, stations) luistert veel nauwer dan de locatie van toegangspunten tot het individuele systeem (opritten, aansluitingen). Dit hangt samen met de noodzaak tot voor- en natransport op het collectief vervoer. Bij de integratie van collectief en individueel vervoer is (bij gelijk schaalniveau) collectief vervoer dus leidend.

**Eerst ideaal, dan bestaand**

Er wordt eerst een ideaalstructuur ontworpen, los van het bestaande. Vervolgens wordt deze ideaalstructuur geconfronteerd met de bestaande situatie. De ingrepen die nodig zijn om van de bestaande naar de ideale situatie te komen, kunnen vervolgens worden geprioriteerd. Op deze manier wordt gewaarborgd dat verbeteringen in het bestaande net samenhang vertonen; de ideaalstructuur fungeert daarbij als een lange termijn focus.

**Eerst kwaliteit, dan capaciteit**

Voor het realiseren van een bepaalde bereikbaarheid dient de functie, en als afgeleide daarvan de gewenste kwaliteit van de verbindingen helder gedefinieerd te worden. Bij de kwaliteit gaat het om zaken als snelheid, betrouwbaarheid en comfort, maar ook om de toe te passen benuttings- en prijsingsconcepten. Een acceptabele verhouding tussen het gebruik en de capaciteit van de infrastructuur is daarbij een noodzakelijke voorwaarde, maar staat in principe los van het gewenste kwaliteitsniveau. In de praktijk wordt maar al te vaak primair een capaciteitsbenadering toegepast, waarbij overige kwaliteitsaspecten onvoldoende aandacht krijgen.

**Eerst toegangspunten, dan netwerk**

Een vervoernetwerk dient voor het onderling verbinden van toegangspunten. Het ligt daarom voor de hand om eerst te definiëren welke punten verbonden moeten worden, om vervolgens de verbindingen tussen deze punten te ontwerpen. In de praktijk gebeurt dit -merkwaardigerwijs- vaak andersom. Een bekend voorbeeld is de tracédiscussie rond de HSL-zuid: de vraag of de hogesnelheidstrein zou moeten stoppen in Den Haag werd afhankelijk gesteld van de keuze voor een tracé (bestaande lijn of nieuw tracé), terwijl de keuze of een stad als Den Haag wel of niet in het HST-net moet worden opgenomen natuurlijk vooraf had moeten gaan aan de tracékeuze. Dit had een zeer verwarrende discussie tot gevolg.

**Eerst functie, dan vorm en techniek**

Alvorens de vorm van de infrastructuur (dwarsprofiel weg, lay-out knooppunten, etc.) vast te kunnen stellen is het noodzakelijk te weten welke functie de weg vervult. Belangrijke functies die onderscheiden worden zijn: stroomfunctie, ontsluitingsfunctie en erffunctie. In het 'Duurzaam Veilig' concept staat deze aanpak centraal: door de vorm af te stemmen op de functie wordt een zeker gebruik van de infrastructuur afgedwongen die de verkeersveiligheid ten goede komt. Het spreekt voor zich dat naast de hierboven vermelde functies aan een weg nog meer functies kunnen worden toegekend (bv. terugvaloptie, buffer, toeristenroute). Bij het toekennen van de vorm zal ook met deze functies rekening moeten worden gehouden. Ook bij de keuze tussen vervoertechnieken (bv. snelbus of lightrail) dient de functie leidend te zijn.

### 3.3 Vuistregels voor de belangrijkste kenmerken van de vervoersystemen

Een groot deel van de kenmerken van vervoersystemen hangt direct samen met het vervoerkundig schaalniveau. Te noemen zijn:

- aantal en omvang te verbinden kernen;
- verplaatsingsafstand;
- gemiddelde snelheid;
- afstand tussen toegangspunten;
- ontsluitingsruimte;
- maximale omwegfactor, en
- maaswijdte.

Deze genoemde kenmerken zijn zeer bepalend hoe het uiteindelijke ontwerp eruit ziet, en hoe de totale vervoermarkt is 'verkaveld' tussen de verschillende vervoerkundige schaalniveaus. Verder blijkt dat deze kenmerken een sterke onderlinge samenhang vertonen binnen een schaalniveau. Onlogische combinaties van kenmerken leiden tot suboptimale en inefficiënte netwerken. In het onderstaande worden de kenmerken kort besproken.

#### **Aantal en omvang te verbinden kernen**

Hoe hoger het schaalniveau is, hoe minder kernen op het netwerk zijn aangesloten. Een netwerk van hoog schaalniveau verbindt alleen de kernen van hoge orde. De 'orde' van een kern wordt o.a. bepaald door inwonertal en voorzieningenniveau. In deze studie is het inwonertal als indicator genomen.

#### **Verplaatsingsafstand**

Kernen van hogere orde genereren langere verplaatsingen. Ook door het geringere aantal geselecteerde kernen zullen de verplaatsingsafstanden in een netwerk van hoog schaalniveau gemiddeld groter zijn dan op lager schaalniveau.

#### **Gemiddelde snelheid**

Omdat over netwerken van hoger schaalniveau gemiddeld langere verplaatsingen worden afgewikkeld, moeten ook hogere gemiddelde snelheden kunnen worden gehaald: een autosnelweg is sneller dan een regionale weg, een intercitytrein is sneller dan een stoptrein; anders heeft het immers geen zin om het hogere schaalniveau te gebruiken.

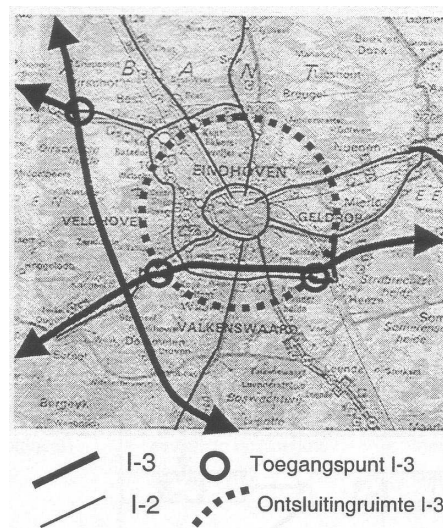
#### **Afstand tussen toegangspunten**

Bij een netwerk van hoger schaalniveau zijn de afstanden tussen de toegangspunten groter. Dit hangt enerzijds natuurlijk direct samen met het geringere aantal kernen dat op het netwerk is aangesloten. Anderzijds heeft het ook te maken met de kwaliteit van de afwikkeling van het vervoer: een intercitytrein die te vaak stopt wordt te langzaam; op een autosnelweg met te veel op- en afritten wordt het doorgaand verkeer te veel gehinderd door korteafstandverkeer.

#### **Ontsluitingsruimte**

De Ontsluitingsruimte is de afstand tussen het centrum van een kern en het bijbehorende toegangspunt. Voor het collectief vervoer is de Ontsluitingsruimte nul, dat wil zeggen dat toegangspunten liefst in het centrum van de kern liggen, om voor- en natransportafstanden en overstapweerstand zoveel mogelijk te beperken. Bij individueel vervoer liggen de toegangspunten meestal juist niet in het centrum. Dit heeft diverse achtergronden:

- het is ongewenst uit oogpunt van leefbaarheid en ruimtegebruik om het toegangspunt midden in de kern te leggen, en
- het in acht nemen van een zekere afstand tussen de kern en het toegangspunt voorkomt dat het netwerk interessant wordt voor gebruik op te laag schaalniveau; de omwegen worden immers te groot.



FIGUUR 3.2: ILLUSTRATIE ONTSLUITINGSSTRUCTUUR

Anderzijds mogen toegangspunten ook weer niet te ver weg liggen, want dan wordt de kwaliteit van de ontsluiting weer te slecht doordat een te lange afstand over wegen van lagere orde moeten worden afgelegd. Figuur 3.2 geeft een voorbeeld van de toepassing van de Ontsluitingsruimte: rondom Eindhoven is een cirkel getrokken waarbinnen in principe geen nationaal netwerk mag liggen (in de figuur I-3 genoemd, I-2 is het regionale netwerk). In het getekende ontwerp is aan deze eis voldaan. Merk op, dat een deel van het nationale netwerk in dit voorbeeld wel door de Ontsluitingsruimte loopt; hier bevinden zich echter geen toegangspunten.

De grootte van de ontsluitingsruimte van het nationale netwerk is globaal bepaald door reistijden via het regionale netwerk en (met een omweg) via het nationale netwerk met elkaar te vergelijken. De ontsluitingsruimte is zo gekozen, dat voor een verplaatsingsafstand van 30 km beide reistijden aan elkaar gelijk zijn.

**Maximale omwegfactor**

De omwegfactor is de verhouding tussen de afstand via het netwerk en de hemelsbrede afstand. Op ieder schaalniveau kan een maximale omwegfactor worden gedefinieerd. Deze hangt af van de snelheidsverhouding met het onderliggende schaalniveau. Bij een te grote omwegfactor in het netwerk wordt het interessant om de verplaatsing via een netwerk van lager schaalniveau te maken.

**Netdichtheid / maaswijdte**

De maaswijdte zegt iets over hoe ver wegen of spoorwegen uit elkaar liggen. Hoe groter de maaswijdte, hoe lager de netdichtheid (de totale schakellengte per oppervlakte-eenheid). Er is gebleken dat de maaswijdte (of de netdichtheid) meestal geen zelfstandig te kiezen grootte is, maar vanzelf volgt uit het aantal kernen, de ontsluitingsruimte en de maximale omwegfactor. Alleen voor netwerken binnen aaneengesloten stedelijk gebied wordt de maaswijdte een zelfstandig te kiezen kenmerk. De ontsluitingsruimten van kernen gaan elkaar daar overlappen, zodat het moeilijk wordt de wegen buiten de ontsluitingsruimten te plaatsen. Dan moet besloten worden welke maaswijdte tussen de wegen moet worden aangehouden.

**3.4 Schema ontwerpstappen**

In deze paragraaf worden de verschillende stappen waaruit de ontwerpmethodiek bestaat, beschreven. Toepassing van de methodiek resulteert in ontwerpen voor de collectieve en individuele netwerken, en de punten (transferia) waarop deze netwerken met elkaar verknoot zijn. Ieder netwerk wordt apart ontworpen. Op deze manier kan elk netwerk optimaal op zijn functie worden toegesneden. Mogelijk worden in een later stadium van het ontwerpproces

verschillende functies weer gecombineerd op een tracé of zelfs op een weg. Dit is dan echter een bewuste keuze die is ingegeven door een rationele afweging tussen voor- en nadelen van het combineren van functies op dat specifieke wegvak.

	<b>Criteria</b>	<b>Acties</b>	<b>Resultaat</b>
<b>Kernenhiërarchie</b> (per schaalniveau)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maximale omvang kernen</li> <li>• Selectiecriteria primaire, secundaire, tertiaire kernen</li> <li>• Ondergrens selectie</li> <li>• Criteria ontsluiting: aantal toegangspunten primaire kernen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Overnemen kernen hoger schaalniveau</li> <li>• Opdelen te grote kernen</li> <li>• Vaststellen primaire, secundaire, tertiaire kernen op betreffende schaalniveau</li> <li>• Vaststellen aantal toegangspunten primaire kernen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kernenhiërarchie op kaart</li> </ul>
<b>Gewenste verbindingen</b> (collectief, individueel)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maximale omwegfactor</li> <li>• Gewenste maaswijdte / netdichtheid</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbinden primaire kernen</li> <li>• Toevoegen verbindingen secundaire kernen</li> <li>• Toevoegen tertiaire kernen mits aan bestaande verbinding en de max. omwegfactor niet bereikt wordt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gewenste verbindingen tussen kernen</li> </ul>
<b>Ideaaltypisch net</b> (collectie, individueel)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gewenste ontsluitingsruimte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trekken cirkels om primaire en secundaire kernen</li> <li>• Bepalen hoofdstromen langs primaire kernen</li> <li>• Bepalen optimale ontsluitingsstructuren</li> <li>• Terugkoppeling maken naar gewenste omwegfactor / maaswijdte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kaart (los van bestaande infrastructuur) met ideale net</li> </ul>
<b>Analyse bestaand net</b> (collectief, individueel, op weg/baanvakniveau)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ontwerpeisen:</li> <li>• Minimale afstand tussen toegangspunten</li> <li>• Ontwerpsnelheden</li> <li>• Eisen aan logische opbouw</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kijken welke bestaande verbindingen de functie van de gewenste verbinding vervullen</li> <li>• Checken ontwerpeisen per verbinding</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kaart met verbindingen op, boven of onder gewenst niveau en onlogische punten in netwerk</li> </ul>
<b>Ontwerp reëel net</b> (per schaalniveau, collectief en individueel)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uitgangspunten om positie op ontwerpassen te bepalen:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Hoeveelheid nieuwe infrastructuur</li> <li>○ Mate scheiding tussen ontwerpniveaus</li> <li>○ Mate verknoping collectief-individueel</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Selectie tracés: volgens ideaal of bestaand</li> <li>• Kiezen hoofdrichting stromen (i.v.m. onlogische punten)</li> <li>• Selecteren toegangspunten voor individuele en collectieve net en voor verknoping beide netten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kaarten met ontwerpen (collectief en individueel, toegangs- / verknopingspunten verschillende schaalniveaus</li> </ul>

TABEL 3.1: SCHEMA ONTWERPSTAPPEN

De beschreven ontwerpstappen moeten zowel voor individuele als voor collectieve netwerken op meerdere schaalniveaus uitgevoerd worden. Hierbij geldt, zoals in de voorgaande paragraaf is beschreven, primair de volgorde 'van hoog naar laag schaalniveau' en 'eerst collectief, dan individueel'. Omdat deze methode primair over het regionale vervoersysteem gaat, zijn vooral het nationale en regionale schaalniveau van belang. Het internationale netwerk wordt als vaststaand aangenomen; de lokale netwerken worden buiten beschouwing gelaten.

Tabel 3.1 geeft een totaaloverzicht van de stappen die gezet worden in de methodiek: wat moet gedefinieerd worden voordat elke stap uitgevoerd kan worden, welke acties horen bij iedere stap, en wat is het resultaat van die stap? In de volgende paragrafen worden deze stappen uitgebreider behandeld aan de hand van de ontwerpcase voor het wegennet in Florida gebaseerd op Immers et al. (2011).

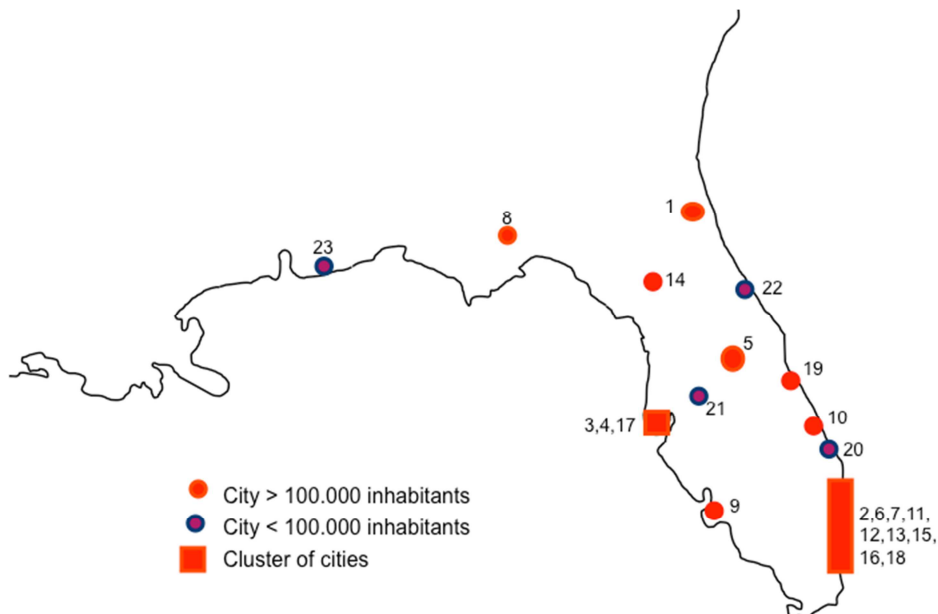
### 3.5 Toepassing van de ontwerpmethodiek

#### 3.5.1 Kernenhierarchie

Deze stap moet voor ieder schaalniveau uitgevoerd worden. In de ontwerpcase betrof dit de hoofdwegennet of het interregionale niveau, het hoogste niveau voor wegennetwerken. In feite betreft deze stap het bepalen welke *kernen* belangrijk genoeg zijn om in de netwerken op te nemen: de meeste verplaatsingen beginnen of eindigen nu eenmaal in een kern. Hierbij moet per schaalniveau ook een maximumafmeting worden vastgesteld; is een kern groter, dan moet hij worden opgedeeld in subkernen. Cijfers over inwonertallen vormen de basis voor de selectie van de kernen, maar ook input van beleidsmakers is in deze stap belangrijk: zij kunnen besluiten om bepaalde kernen of ruimtelijke knopen die niet aan het inwonersaantal-criterium voldoen (bijvoorbeeld toeristische attracties) toch op te nemen.

In de ontwerpcase is voor het hoofdwegenniveau onderscheid gemaakt tussen primaire en secundaire kernen (Figuur 3.3). De selectiecriteria zijn daarbij als volgt:

- primaire kernen: meer dan 100.000 inwoners (kernen 1 tot en met 19);
- secundaire kernen: minder dan 100.000 inwoners (kernen 20 tot en met 23).



FIGUUR 3.3: STAP 1 ONTWERP IDEAALTYPISCH NET: OP TE NEMEN KERNEN (IMMERS ET AL., 2011)

Typisch voor Florida is dat er grote clusters van primaire kernen zijn. Conform de indeling in schaalniveaus zijn dit agglomeraties of metropolen. Hiermee zou je kunnen stellen dat er 3 niveaus zijn: clusters, primaire kernen en secundaire kernen.

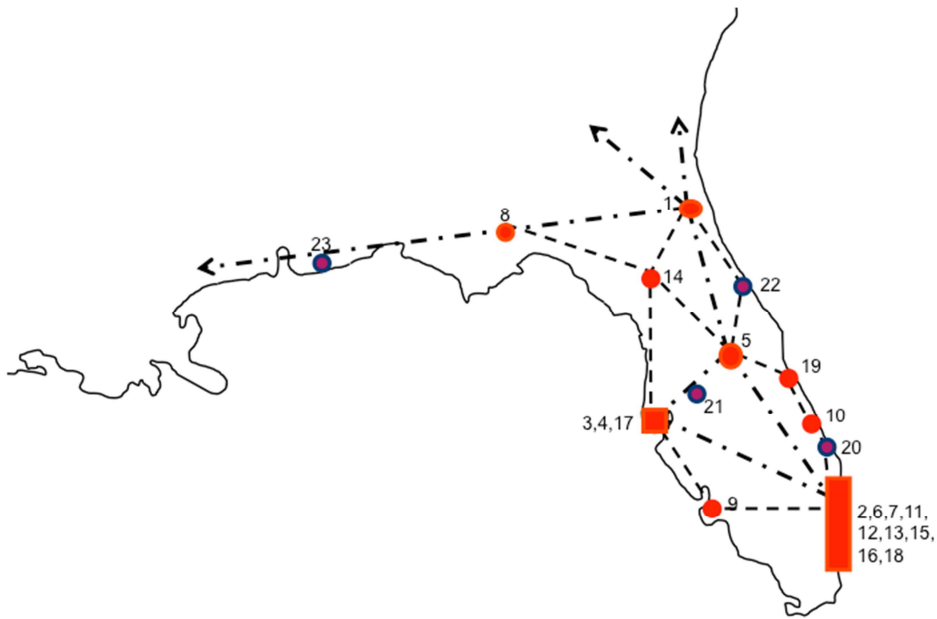
Ook moet in deze stap nagedacht worden over het aantal toegangspunten (bijvoorbeeld treinstations, opritten snelwegen) dat de kernen moeten hebben op de netwerken.

### 3.5.2 Gewenste verbindingen

In deze stap wordt bepaald welke kernen zeker op het netwerk aangesloten moeten worden, en welke verbindingen daarbij de grootste prioriteit hebben. Er is nog geen sprake van tracés; op de kaart worden hart-op-hart verbindingen aangegeven. Er moeten veronderstellingen worden gedaan over wat de gewenste maaswijdte is (of de gewenste netdichtheid), en welke omwegfactoren acceptabel zijn. Bij het verbinden van de kernen (eerst de primaire (Figuur 3.4), dan de secundaire (Figuur 3.5)) moet aan deze eisen voldaan worden. Alle primaire en secundaire kernen worden opgenomen, en als tussen twee primaire (en evt. secundaire) kernen de omwegfactor te groot wordt, moet een verbinding toegevoegd worden. De acceptabele omwegfactoren zijn afhankelijk van de verhouding tussen de ontwerpsnelheden op de verschillende schaalniveaus. Voor het interregionale schaalniveau wordt als richtsnoer een maximale omwegfactor van 1,4 aangehouden (voor een regionaal schaalniveau kan een hogere waarde worden gekozen, bijvoorbeeld 1,7). De maaswijdte volgt in dit geval vanzelf uit het aantal kernen, de ontsluitingsruimte en de maximale omwegfactoren.



FIGUUR 3.4: STAP 2.1 ONTWERP IDEEAALTYPISCH NET: HART-OP-HART VERBINDINGSSTRUCTUUR PRIMAIRE KERNEN (IMMERS ET AL., 2011)

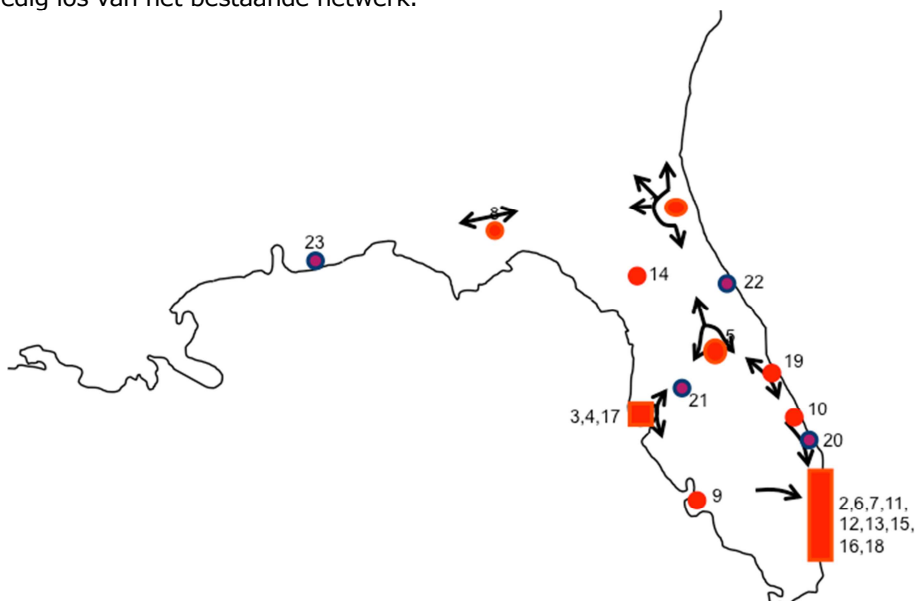


FIGUUR 3.5: STAP 2.2 ONTWERP IDEEAALTYPISCH NET: HART-OP-HART VERBINDINGSSTRUCTUUR ALLE KERNEN (IMMERS ET AL., 2011)

### 3.5.3 Ideaaltypisch net

Allereerst moet bepaald worden hoe groot de gewenste ontsluitingsruimte is: hoever van de bebouwing dienen de toegangspunten idealiter te liggen? Op interregionaal niveau moeten de wegen buiten de kernen om. Ook op regionaal niveau is het van belang dat de tracés van het individuele net niet door de bebouwde kom lopen (behalve binnen stedelijke gebieden, waar dit onvermijdelijk is: daar is de gewenste maaswijdte maatgevend). Voor de toegangspunten van het collectieve net geldt dat deze toegangspunten liefst midden in de bebouwing liggen.

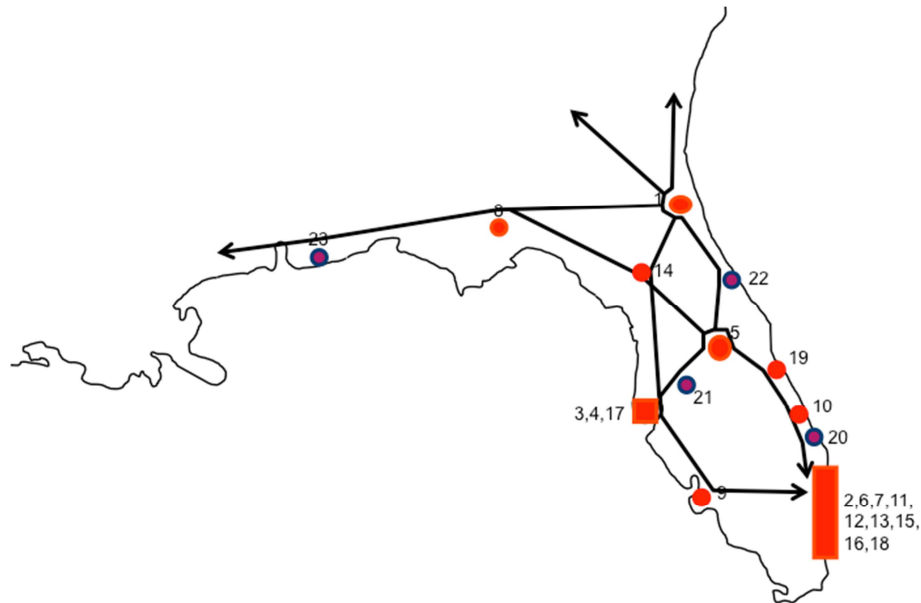
Als eerste wordt bij de kernen bepaald hoe de belangrijkste stromen deze kernen passeren (Figuur 3.6). Daarna worden de kernen verbonden met de in de vorige stap ontworpen schakels. Indien sprake is van aanvaardbare omwegen, kunnen parallelle routes worden samengevoegd (bijvoorbeeld tussen beide clusters alleen de verbinding via 9 handhaven). Het resulterende ideaaltypisch net (Figuur 3.7) staat in principe volledig los van het bestaande netwerk.



FIGUUR 3.6: STAP 3.1 ONTWERP IDEEAALTYPISCH NET: ONTSLUITINGSSTRUCTUREN



(IMMERS ET AL., 2011)



FIGUUR 3.7: STAP 3.2 ONTWERP IDEAALTYPISCH NET (IMMERS ET AL., 2011)

### 3.5.4 Analyse bestaand net

Bij de analyse van het bestaande net wordt bekeken of bestaande verbindingen (individueel: wegen; collectief: openbaar vervoerdiensten) op het gewenste niveau functioneren. Daarvoor moet eerst gedefinieerd worden aan welke eisen een verbinding moet voldoen om als functionerend op het juiste niveau gekenmerkt te worden. De ideaaltypische netten geven aan welke verbindingen gewenst zijn; het is dan een kwestie van het zoeken van een bestaande verbinding die zo goed mogelijk past, en aangeven of die op het juiste niveau functioneert.

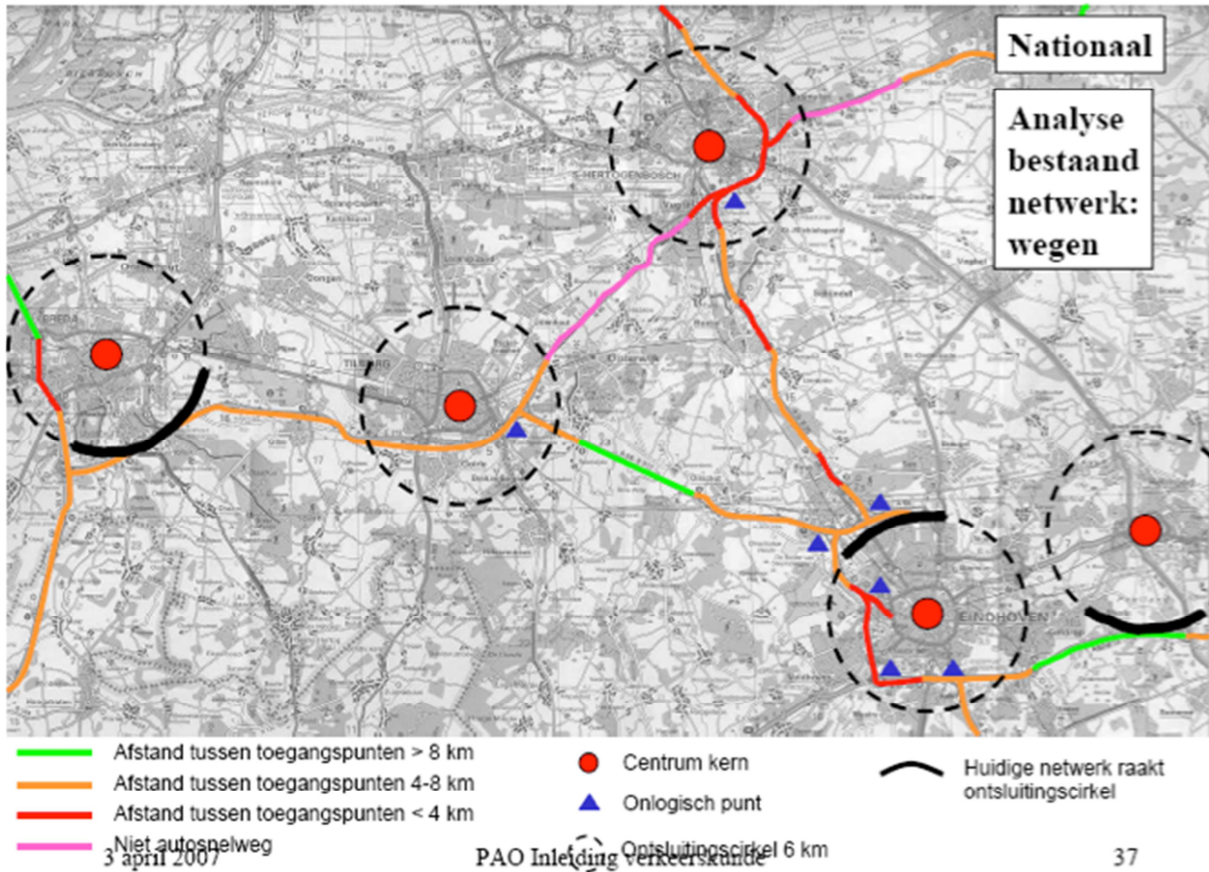
Tabel 3.2 laat de basiseisen zien die voor een studie in Nederland zijn geformuleerd. Gekozen is voor ontsluitingscirkels met een straal van 6 km voor de primaire kernen: alle bebouwing ligt (ruim) binnen deze cirkels, maar toegangspunten die op de cirkel zouden moeten komen te liggen, liggen daarmee niet te ver van het centrum.

Ontwerpeis	Interregionaal	Regionaal
ontsluitingsruimte	ontsluitingscirkel met straal van 6 km	buiten bebouwde kom
afstand tussen toegangspunten	minimaal 8 km	-
ontwerpsnelheden individueel	120km/h	80km/h
ontwerpsnelheden collectief	120km/h	80km/h
eisen aan logische opbouw netwerken	doorgaande route is voor hoofdstroom	-
intervaltijden collectief spits	30min	15 min
intervaltijden collectief dal	30min	30min

TABEL 3.2: GEFORMULEERDE BASISEISEN VOOR ANALYSE BESTAAND NET.

Figuur 3.8 toont de resultaten van de analyse van het interregionale netwerk in Noord-Brabant in 2002. Slechts een beperkt aantal wegvakken functioneren momenteel op het gewenste niveau. Grote stukken van het netwerk hebben teveel toegangspunten, sommige delen zijn nu nog geen

autosnelweg, en bij de steden lopen de wegen vaak door de ontsluitingscirkels. Tenslotte zijn vooral bij Eindhoven veel onlogische punten te vinden: knooppunten waar de hoofdstroom af moet slaan, wat bij druk verkeer vaak vertraging veroorzaakt.



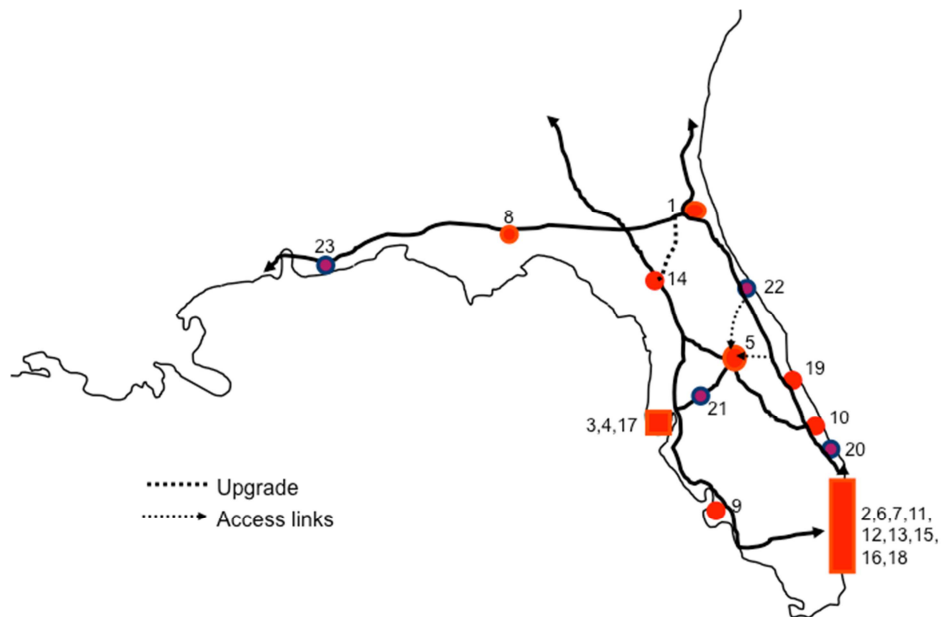
FIGUUR 3.8: STAP 4: ANALYSE BESTAAND NETWERK: INTERREGIONAAL NETWERK NOORD-BRABANT (EGETER, 2007)

### 3.5.5 Ontwerpen reële netwerken

De stap van ideaaltypisch netwerk en reëel netwerk kan op allerlei manieren. In het ontwerp voor Florida is naar 3 punten gekeken:

1. De positie van Gainesville (14) in het netwerk;
2. De centrale ligging van de hoofdwegen in Orlando;
3. De route langs de kust van Jackson (1) naar het Miami-cluster.

Gegeven het bestaande netwerk kan met het opwaarderen van een weg richting Jacksonville (1) de ideale netwerkstructuur redelijk worden benaderd. Het veranderen van de centrale ligging in Orlando zou zeer hoge kosten met zich meebrengen. Wel is het aan te bevelen het aantal aansluitingen in Orlando (5) te reduceren, zodat de weg beter aan de functionele eisen voldoet. Het gebruik van de kustroute heeft als consequentie dat een tweetal wegen moet worden opgewaardeerd om goede verbindingen vanaf de kust naar Orlando (5) te realiseren. Het resultaat is te zien in Figuur 3.9. Overigens in de driehoek Gainesville (14), Orlando (5) en Tampa (3) een zogenaamde Steiner-knoop te zien. In het ideale netwerk is een driehoek voorgesteld maar het vertakte netwerk met de Steiner-knoop in het midden geeft in noord-zuid richting bijna dezelfde verbindingskwaliteit met een kortere weglengte.



FIGUUR 3.9: STAP 5 ONTWERP REËEL NETWORK (IMMERS ET AL., 2011)

Voor de studie voor Noord-Brabant zijn ontwerpen gemaakt waarin gevarieerd is met het thema ontvlechten, aparte rijbanen per functioneel niveau, en met de mate waarin het wegennetwerk kan worden verknoopt met het openbaarvervoernetwerk. Ontvlechten kan parallel zoals nu bij Den Bosch en Eindhoven, maar had ook op enige afstand gekund. Zo is in die studie voor doorgaand verkeer een nieuwe A2 ten westen van Den Bosch, Eindhoven en Valkenswaard ontworpen. De huidige A2 zou dan een regionale functie krijgen. Verknoping met het openbaar vervoer kan op verschillende schaalniveaus. Bij Lage Zwaluwe is een knoop met het spoorwegnetwerk richting de Randstad ontworpen, terwijl bij de grote steden overstappunten aan de rand van de steden zijn gepland. Probleempunt hierbij is wel dat plaatsen waar de netwerken voor auto en openbaar vervoer elkaar kruisen beperkte mogelijkheden bieden voor een goede verknoping, zeker voor de hogere netwerkniveaus.

De ideaaltypische netwerk in combinatie met de analyse van het bestaande netwerk biedt dus veel mogelijkheden om het bestaande netwerk te verbeteren. Met behulp van een verkeersmodel kan inzicht worden verkregen in de effecten van voorgestelde varianten. Samen met een afweging van de benodigde kosten (en de beschikbare budgetten) is dit een goede en transparante methode om tot een verbeteringsstrategie van netwerken te komen.

## 4 INFRASTRUCTUURPLANNING

### 4.1 Inleiding

Als wordt overwogen om nieuwe infrastructuur aan te leggen of om bestaande infrastructuur aan te passen, bijvoorbeeld een wegverbreding, dan hebben we te maken met infrastructuurplanning. In dit hoofdstuk gaan we in op 3 aspecten: de tracering van infrastructuur, planvormen en procedures, en de effecten van infrastructuur. Bij de tracering van infrastructuur komen de technieken Zeefanalyse (welke gebieden zijn niet geschikt) en Potential Surface Analysis (PSA, hoe geschikt is een gebied). Zoals gezegd ligt de focus op tracering, maar deze technieken zijn ook geschikt voor het vinden van een geschikte locatie voor een infrastructurele voorziening. Van de planvormen worden de twee voornaamste vormen kort beschreven: Structuurvisie en Bestemmingsplan. Bij het plannen van een specifiek project is de nieuwe planprocedure met als motto "Sneller en Beter" het voornaamste onderwerp. In de paragraaf over de effecten van infrastructuur wordt ingegaan op de voornaamste karakteristieken en berekeningswijzen voor geluidshinder, luchtkwaliteit, verkeersveiligheid en kosten-batenanalyse.

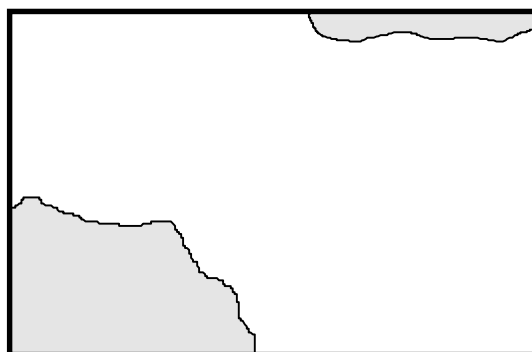
### 4.2 Tracering

#### 4.2.1 De Zeefanalyse

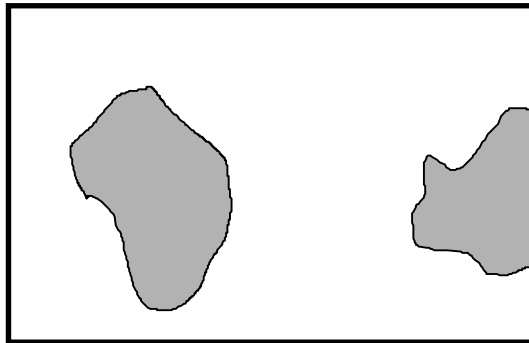
De zeefanalyse is een eenvoudig te gebruiken methode, die zowel op regionaal als op lokaal niveau toepasbaar is.

De eerste stap in de zeefanalyse is het opstellen van een lijst factoren, die restricties kunnen opleggen aan de gewenste nieuwe ontwikkeling, bijvoorbeeld slechte draagkracht van de grond, natuurgebied, etc. De volgende stap is het verrichten van onderzoek naar deze factoren en het aangeven van de gebieden die ongeschikt zijn door die factor. De resultaten kunnen worden weergegeven op transparant papier dat over de kaart is gelegd (zie ook en ). De zeefanalyse vindt plaats door alle transparanten op elkaar te leggen, waardoor een gecombineerd beeld van alle factoren in het gebied ontstaat (). Het niet gemarkeerde gebied kan als meest geschikt om tot ontwikkeling te brengen worden aangemerkt. Veelal zal het gebied te groot zijn voor de functie die men in gedachten had. Dan kan van dit overgebleven gebied een verdere analyse worden gemaakt om het meest geschikte gebied daarbinnen te vinden.

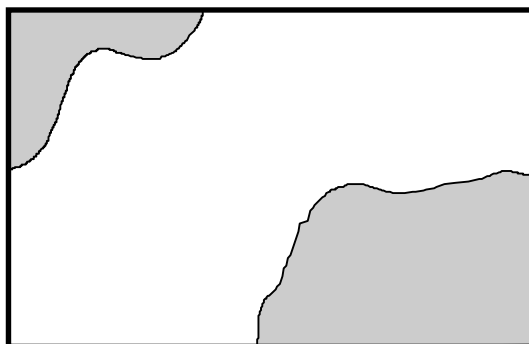
In de zeefanalyse wordt dus het principe gebruikt van ja of nee, wel of niet. Tussenvormen zijn er niet. Wanneer voor één factor het oordeel negatief is, wordt een definitief veto over het gebied uitgesproken. De methode is daardoor nogal grof, maar wel vrij snel uit te voeren en zeer geschikt om een eerste selectie te maken, waardoor veel tijd kan worden bespaard wanneer vervolgens andere methoden worden gebruikt.



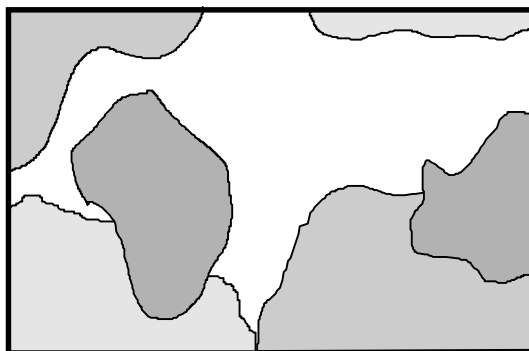
FIGUUR 4.1: GEBIED ONGESCHIKT OP GROND VAN CRITERIUM A



FIGUUR 4.2: GEBIED ONGESCHIKT OP GROND VAN CRITERIUM B



FIGUUR 4.3: GEBIED ONGESCHIKT OP GROND VAN CRITERIUM C



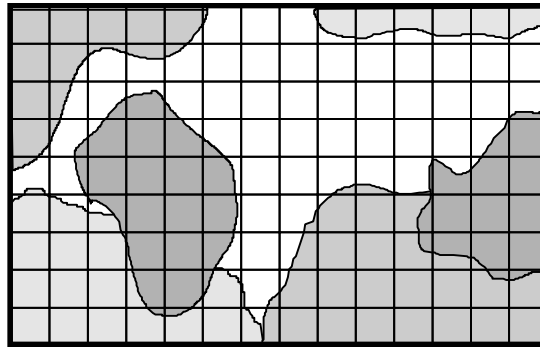
FIGUUR 4.4: RESULTAAT ZEEFANALYSE: WIT IS GESCHIKT EN GRIJS IS ONGESCHIKT GEBIED

#### 4.2.2 Het aanbrengen van een cellulair grid

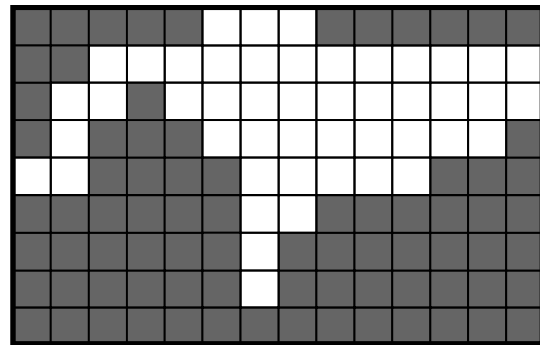
Een kenmerk van de potential surface analysis (PSA) is het werken binnen een cellulair grid. Voordat begonnen wordt, wordt daarom eerst een raster over het gebied gelegd. In het algemeen verdient het de voorkeur dit zo te doen, dat cellen van  $100 * 100 \text{ m}^2$  tot  $250 * 250 \text{ m}^2$  ontstaan, maar in sommige gevallen zal men er voor kiezen grotere cellen te nemen. De maat van de cellen is onder meer afhankelijk van de homogeniteit van het gebied en de minimale omvang van de eenheden waarin de functies gelokaliseerd worden. Gebruikt men kleinere cellen, dan zal de beschikbare informatie van het gebied ook gedetailleerder aanwezig moeten zijn.

In Figuur 4.5 is de indeling van het gebied in cellen weergegeven en Figuur 4.6 toont de vertaling van de resultaten van de zeefanalyse (geschikt en ongeschikt *gebied*) naar een voor de PSA bruikbare input (geschikte en ongeschikte *cellen*). Bij de 'vertaling' is een cel die voor meer dan 50% ongeschikt was, als ongeschikt aangemerkt. Bedenk dat ook door de exacte ligging en de precieze maat van het raster sommige cellen net wel of net niet als geschikt worden aangemerkt.

Het omzetten van analoog naar digitaal zal altijd gepaard gaan met verlies aan informatie. Dit is onvermijdbaar.



FIGUUR 4.5: OVER HET GEBIED WORDT EEN RASTER GELEGD



FIGUUR 4.6: OVERZICHT GESCHIKTE (WITTE) EN ONGESCHIKTE (GRIJZE) CELLEN

Zoals blijkt uit ook Figuur 4.1 tot en met Figuur 4.4 is het om een zeefanalyse uit te kunnen voeren absoluut niet noodzakelijk vooraf een cellulair grid aan te brengen. Het is echter wel mogelijk. Over de kaart van het gebied wordt dan eerst een raster gelegd en vervolgens wordt bekeken of over een cel al dan niet een veto moet worden uitgesproken op grond van een criterium. Het voordeel van deze werkwijze is dat reeds afgevalen cellen niet voor elk volgend criterium nogmaals de zeefanalyse moeten doorlopen.

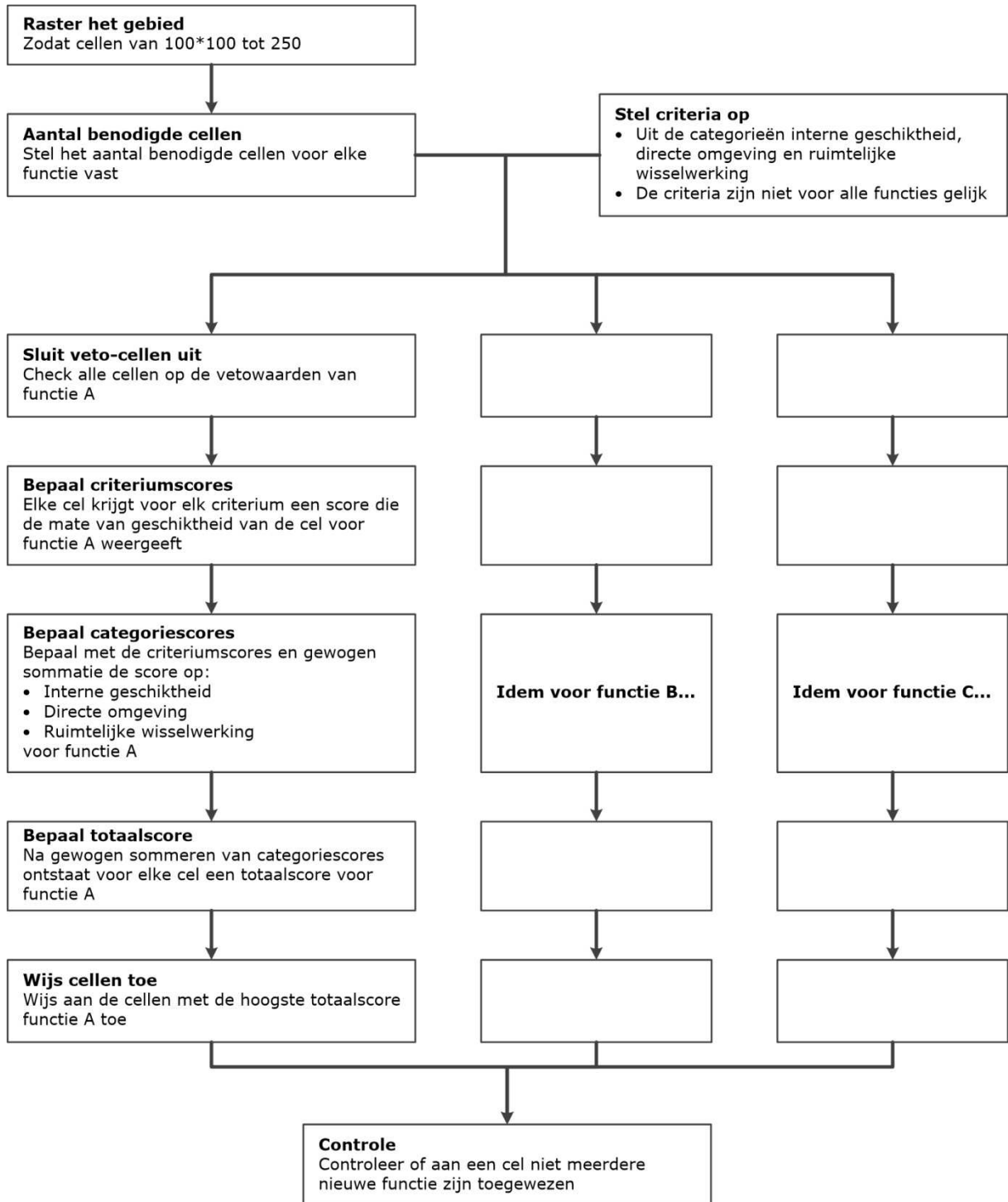
### Gevoeligheid

Tussen de resultaten van een zeefanalyse bij vooraf en achteraf rasteren kunnen kleine verschillen bestaan. Dit kan het beste worden geïllustreerd aan de hand van een voorbeeld. Beschouw uit Figuur 4.6 de zevende cel van de onderste rij. Zoals in deze figuur te zien is, wordt deze cel als ongeschikt aangemerkt wanneer ná de eigenlijke zeefanalyse wordt gerasterd, omdat de cel voor meer dan 50% ongeschikt is. Stel nu dat vooraf was gerasterd. Noch op grond van criterium A, noch op grond van criterium B, noch op grond van criterium C zou de cel ongeschikt verklaard zijn, omdat volgens geen van deze criteria de cel voor meer dan 50% ongeschikt is. Slechts criterium B en C samen maken de cel voor meer dan 50% ongeschikt, hetgeen alleen bij achteraf rasteren tot uitdrukking komt.

### 4.2.3 Potential surface analysis

De Potential Surface Analysis is een methode om systematisch de geschiktheid van een gebied voor een specifieke ontwikkeling vast te stellen en om de resultaten op een overzichtelijke manier te presenteren. Daarvoor moet het gebied worden ingedeeld in cellen, zoals in de vorige paragraaf beschreven. Met behulp van een aantal criteria worden de cellen beoordeeld op hun mogelijkheden. De werkwijze is in geïllustreerd. Nadat het gebied gerasterd is, wordt op basis van het ruimtelijk programma het benodigde aantal nieuwe cellen voor een functie bepaald. Een functie van een cel kan zijn wonen, landbouw, natuur, industrie, etc. Voor elke functie toetsen we de geschiktheid van de cel met behulp van vooraf opgestelde criteria. Op die manier wordt dus tot uitdrukking gebracht

welke cel het meest geschikt is voor welke functie. Uiteindelijk kunnen we aan een cel of aan cellen, die het hoogst scoren voor een zekere functie, die functie toewijzen.



FIGUUR 4.7: WERKWIJZE POTENTIAL SURFACE ANALYSIS

De te gebruiken criteria kunnen worden verdeeld in drie categorieën:

1. Interne geschiktheid (suitability): hierbij gaat het om de eigenschappen van de cel zelf, zoals draagkracht van de grond, aankoopkosten en huidig grondgebruik.
2. Directe omgeving (surroundings): het betreft hier de acht direct aangrenzende cellen, die door hun functie/grondgebruik, de te beschouwen cel mogelijk beïnvloeden.
3. Ruimtelijke wisselwerking: nu worden alle overige cellen beschouwd. Het gaat dan bijvoorbeeld om afstanden (naar het centrum e.d.) of om overlast van een nabij gelegen weg.

Het is bij een PSA belangrijk de scores op een systematische manier te schalen, bijvoorbeeld op een schaal van 1 tot 5. Hierbij betekent een 1 altijd dat een cel geschikt is en een 5 dat een cel ongeschikt is. Door op deze manier te scoren kan voor een tracé de route tussen een begin- en eindpunt worden gezocht waarbij de som van de celwaarden minimaal is. Zoals al in het hoofdstuk over verkeersmodellering is opgemerkt zijn er efficiënte algoritmen voor het kortste route probleem. Het overigens ook mogelijk een weging tussen de celscores te gebruiken. Hierdoor wordt feitelijk een soort multi-criteria techniek toegepast.

Bij traceringsstudies is het vaak wenselijk om alternatieven te generen. Deze kunnen worden gevonden door te variëren met de begin- en eindpunten van het tracé, met eventuele tussenpunten die moeten worden aangedaan, of met de weging van de criteria (of een selectie van criteria) in de PSA-analyse.

Het resultaat van zo'n PSA analyse bestaat dus uit één of meer tracés. Deze tracés moet ten slotte nog worden bekeken op hun haalbaarheid wat betreft de geometrie. Denk bijvoorbeeld aan minimaal wenselijke boogstralen of een globale beoordeling van de hoogteligging in het landschap. Tracés die hele scherpe bogen vragen of veel (onnodige) hellingen hebben, kunnen in zo'n analyse worden verworpen.

### 4.3 Planvormen en planprocedures

In alle voorgaande hoofdstukken zijn vraagstukken als 'waar wordt iets gevestigd of ontwikkeld' en 'waar is nieuwe transportinfrastructuur (weg, spoor, etc.) nodig en hoe moet dat worden getraceerd' vanuit een puur technische hoek behandeld. In de praktijk is hier regelgeving voor en zijn ook procedures vastgesteld. In deze paragraaf wordt kort nader op deze aspecten ingegaan.

#### 4.3.1 Planvormen

De planvormen en hun status zijn vastgelegd in de Wet op de Ruimtelijke Ordening. Het motto van deze wetgeving is simpel samengevat "Decentraal wat kan, centraal wat moet". Globaal gezien is onderscheid tussen structuurvisies en bestemmingsplannen.

Structuurvisies worden door overheden op alle ruimtelijke schaalniveaus ontwikkeld om aan te geven wat de lange termijnvisie is op de ruimtelijke ontwikkeling: waar is welke functie (wonen, industrie, natuur, wegen en spoorwegen, etc.) gewenst? Een structuurvisie is niet direct juridisch bindend maar tegelijkertijd wel het uitgangspunt voor bestemmingsplannen. Structuurvisies worden bijvoorbeeld ontwikkeld door het Rijk: bijvoorbeeld de Structuurvisie Infrastructuur en Ruimte (Ministerie van Infrastructuur & Milieu, 2012) of de Structuurvisie Buisleidingen/ Daarnaast is het mogelijk een (inter-)gemeentelijke of (inter-)provinciale structuurvisie te ontwikkelen. Een voorbeeld is de Structuurvisie Randstad 2040 (VROM 2008). Hierbij is het de bedoeling dat deze structuurvisies op elkaar zijn afgestemd. Overheden kunnen elkaar in een structuurvisie niet binden.

In Bestemmingsplannen wordt door gemeenten het juridisch kader vastgelegd. Hierin is vastgelegd op welke plek welke bestemming mag worden gerealiseerd, inclusief daarbij geldende regels of voorschriften. Bij deze nadere specificatie kan bijvoorbeeld worden gedacht aan het soort woningen en grenzen wat betreft bouwmvang of bouwhoogte. Nieuwe projecten moeten altijd aan de geldende bestemmingsplannen worden getoetst. Het bestemmingsplan is de enige ruimtelijke planvorm die algemeen voor de burgers (en overheid) juridisch bindend is.



Voor de totstandkoming van zowel Structuurvisies als Bestemmingsplannen zijn procedures vastgelegd voor de betrokkenheid van burgers en organisaties. Bij het juridisch zwaardere Bestemmingsplan gelden expliciete procedures voor inspraak, bezwaar en beroep. Idealiter is er consistentie tussen de structuurvisies onderling en tussen de structuurvisie(s) en de bestemmingsplannen. In de praktijk kunnen er natuurlijk verschillen ontstaan, bijvoorbeeld een nieuwe structuurvisie terwijl er nog een oud bestemmingsplan van toepassing is. In dat geval is een herzieningsprocedure noodzakelijk waar dezelfde waarborgen van toepassing zijn als bij de totstandkoming van bestemmingsplannen.

#### 4.3.2 Procedures voor infrastructuurprojecten

Als het gaat om transportinfrastructuur zijn er twee procedures die aandacht verdienen:

- De NMCA (Nationale Markt en Capaciteitsanalyse) (Ministerie van Infrastructuur en Milieu 2011) en MIRT (Meerjarenprogramma Infrastructuur, Ruimte en Transport) (Ministerie van Infrastructuur en Milieu et al., 2013)
- De planprocedure voor individuele infrastructuurprojecten

Het Rijk maakt regelmatig een uitgebreide analyse van de kwaliteit van de infrastructuur in de toekomst. Hierbij wordt gekeken hoe de mobiliteit zich zou kunnen ontwikkelen (Markt) en welke infrastructuur in de toekomst beschikbaar is (Capaciteit). Deze toekomstige infrastructuur bestaat uit de huidige infrastructuur plus alle in het zogenoemde MIRT-projectenboek vermelde planstudie- en realisatieprojecten. Doel van deze analyse is om na te gaan waar in de toekomst knelpunten zijn te verwachten. Bij deze analyse wordt onder andere uitgebreid gebruik gemaakt van het verkeers- en vervoermodelinstrumentarium van Rijkswaterstaat (LMS en NRM). Het gebruikte beoordelingskader is gebaseerd op de doelen zoals vastgelegd in de Structuurvisie Infrastructuur en Ruimte. Zo geldt voor het wegennet het criterium dat de reistijd in de spits niet meer mag zijn dan 1,5 maal de reistijd buiten de spits. Binnen de NMCA wordt apart gekeken naar wegen, spoor, openbaar vervoer en binnenvaart. De in een NMCA geconstateerde knelpunten worden op de agenda gezet voor het MIRT.

Het MIRT geeft aan met welke infrastructuurprojecten het Rijk bezig is. Het gaat hier om projecten die worden uitgevoerd, projecten die in een planstudiefase zitten en om nieuw geagendeerde projecten. Het MIRT wordt jaarlijks aangepast zodat kan worden ingespeeld op nieuwe beleidsprioriteiten en/of financiële randvoorwaarden. Budgettaire beperkingen kunnen er bijvoorbeeld toe leiden dat projecten vooruit worden geschoven of gefaseerd worden uitgevoerd.

Voor individuele infrastructuurprojecten werd na een "nut en noodzaak discussie" een procedure gevolgd waar in de Tracéstudie een groot aantal alternatieven gedetailleerd werd geanalyseerd en waarbij ook in late fasen van het project uitgebreide inspraak en juridische bezwaarprocedures mogelijk waren. Beide leiden tot een zeer lange doorlooptijd van projecten. In 2008 is het advies van de Commissie Elverding uitgebracht (Adviescommissie Versnelling Besluitvorming Infrastructurele Projecten, 2008). Het kernidee van deze commissie is dat een projectstudie in twee delen wordt gesplitst, ook wel Zeef 1 en Zeef 2 genoemd.

In de eerste stap wordt een groot aantal alternatieven in beschouwing genomen, met nadrukkelijk aandacht voor alternatieven die geen nieuwe infrastructuur vragen. Deze alternatieven worden globaal geanalyseerd op hun effecten. Belangrijke doelen in deze stap zijn het verkrijgen van maatschappelijk draagvlak en het komen tot een politiek besluit over een voorkeursoplossing. Inspraak en het betrekken van allerlei organisaties speelt hierbij dus een belangrijke rol.

Zoals gezegd gaat het niet alleen om infrastructurele maatregelen. Formeel moeten de volgende oplossingsrichtingen in de analyses worden meegenomen:

1. Sturen op ruimtelijk programma
2. Beprijzing (op een andere manier betalen voor mobiliteit)
3. Mobiliteitsmanagement
4. Optimalisatie van Openbaar Vervoer
5. Beter benutten (verkeersmanagement)
6. Aanpassing van bestaande infrastructuur
7. Nieuwe infrastructuur

Kansrijk geachte alternatieven worden in de eerste stap globaal getoetst op basis van kosten, milieueffecten, Natura2000-richtlijnen en een kosten/batenanalyse. In sommige studies kan ook een business case worden gemaakt. Na inspraak en politieke besluitvorming is het resultaat een kleine set van voorkeursalternatieven.

De Natura2000-richtlijnen zijn Europese richtlijnen die gaan over het beheer en de bescherming van een aantal gebieden die voor natuur en biodiversiteit van belang zijn.

In de tweede stap worden de gekozen voorkeursalternatieven, in principe 2 á 3 alternatieven, gedetailleerd uitgewerkt. In feite is de procedure hier vergelijkbaar met de oude werkwijze, alleen het aantal alternatieven is sterk gereduceerd. Met behulp van een uitgebreide verkeersmodelstudie (NRM) worden verkeersgegevens berekend die de invoer zijn voor een kosten-baten analyse (Romijn & Renes, 2013), een milieueffectrapportage en een eventuele business case. Ook wordt hier een Natura2000-toets uitgevoerd. Het resultaat van deze stap is één voorkeursalternatief voor een MIRT-planuitwerkingsfase. Bij deze keuze is er de mogelijkheden van inspraak en bezwaar, maar wel binnen de context van de politieke besluitvorming uit de eerste stap.

#### 4.4 Bepaling effecten van infrastructuuralternatieven

Zoals uit de vorige paragraaf blijkt wordt in een projectstudie nadrukkelijk naar een groot aantal effecten van infrastructuur gekeken. Enerzijds gaat het om milieu aspecten zoals geluidshinder, luchtkwaliteit, energieverbruik en CO<sub>2</sub>, en anderzijds om economische aspecten als de kosten en baten. Een derde belangrijk aspect is de veiligheid. Hier gaat het om verkeersveiligheid en externe veiligheid: het risico voor personen in de omgeving van de infrastructuur als gevolg van een incident op de infrastructuur (bijvoorbeeld een ongeluk met een vrachtwagen met chemische stoffen). In deze paragraaf wordt een aantal van deze aspecten kort besproken.

##### 4.4.1 Geluidshinder

Voor de berekening van hoeveelheid geluid zijn twee rekenmethodes beschikbaar. De eerste is een vereenvoudigde methode die goed bruikbaar is voor algemene analyses. De tweede methode berekent gedetailleerd het geluidsniveau rekening houdend met alle objecten in de omgeving van de weg (Reken- en meetvoorschrift Geluid, Overheid.nl, 2012).

Om inzicht in te geven in de belangrijkste relaties en componenten wordt kort de eerste rekenmethode (SRM I) beschreven. Het equivalente geluidsniveau  $L_{Aeq}$  in dB(A) vanwege het wegverkeer wordt gevonden uit:

$$L_{Aeq} = E + C_{optrek} + C_{reflectie} - D_{afstand} - D_{lucht} - D_{bodem} - D_{meteo} \quad \text{VERGELIJKING 4.1}$$

Waarin

- $E$ : emissiegetal (maat voor de bronsterkte en afhankelijk van maatgevende verkeersintensiteiten, snelheden en wegdektype);
- $C_{optrek}$ : correctieterm in verband met eventuele met verkeerslichten geregelde kruisingen van wegen, of in verband met obstakels in de weg die de gemiddelde snelheid sterk verlagen;
- $C_{reflectie}$ : correctieterm in verband met eventuele reflecties tegen bebouwing of andere verticale vlakken;
- $D_{afstand}$ : term die de verzwakking als gevolg van de afstand in rekening brengt;
- $D_{lucht}$ : term die de verzwakking als gevolg van luchtdemping in rekening brengt;
- $D_{bodem}$ : term die de verzwakking als gevolg van het bodemeffect in rekening brengt;
- $D_{meteo}$ : term die het verschil tussen de meteorologisch gemiddelde geluidsoverdracht en de als referentie genomen meewind situatie in rekening brengt.

Het emissiegetal is energetische sommatie van de emissiegetallen per voertuigtype:

$$E = 10 \lg \left( 10^{\frac{E_{lv}}{10}} + 10^{\frac{E_{mv}}{10}} + 10^{\frac{E_{zv}}{10}} \right)$$

VERGELIJKING 4.2

met:

$E_{lv}$ ,  $E_{mv}$  en  $E_{zv}$  de emissiegetallen van respectievelijk de lichte (index  $lv$ ), middelzware (index  $mv$ ) en de zware (index  $zv$ ) motorvoertuigen.

De emissiegetallen zelf zijn een functie van de verkeerssamenstelling en de maatgevende intensiteit:

$$E_x = \alpha + \beta \lg \left( \frac{v_x}{v_0} \right) + 10 \lg \left( \frac{Q_x}{v_x} \right) + C_{wegdek,x}$$

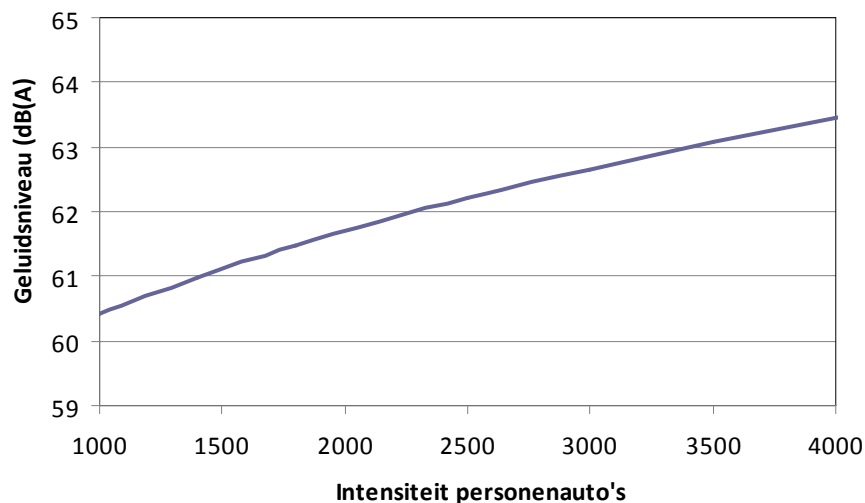
VERGELIJKING 4.3

met:

- $v_0$ : referentiesnelheid
- $v_x$ : snelheid voertuigtype  $x$
- $Q_x$ : maatgevende intensiteit voertuigtype  $x$
- $C_{wegdek,x}$ : Correctiefactor voor wegdeksoort voor voertuigtype  $x$

In de praktijk speelt met name het aandeel vrachtverkeer en de verdeling over zwaar en middelzwaar een grote rol. Voor de beoordeling van het geluidsniveau wordt onderscheid gemaakt naar een aantal perioden per dag, waarbij voor de nacht de laagste geluidsniveaus worden gehanteerd.

Deze formules laten duidelijk zien dat voor een geluidsberekening een groot aantal omgevingsfactoren nodig zijn. Verder zijn gedetailleerde gegevens over de verkeerssamenstelling noodzakelijk (voertuigtype, verdeling over perioden van de dag). Ten derde is de relatie tussen geluidsniveau en de hoeveelheid verkeer logaritmisch (zie Figuur 4.8). Er zijn dus forse reducties in intensiteiten noodzakelijk om een lager geluidsniveau te halen. Vaak zijn dan maatregelen rondom de weg effectiever.



FIGUUR 4.8: VOORBEELD RELATIE VERKEERSINTENSITEIT EN GELUIDSNIVEAU

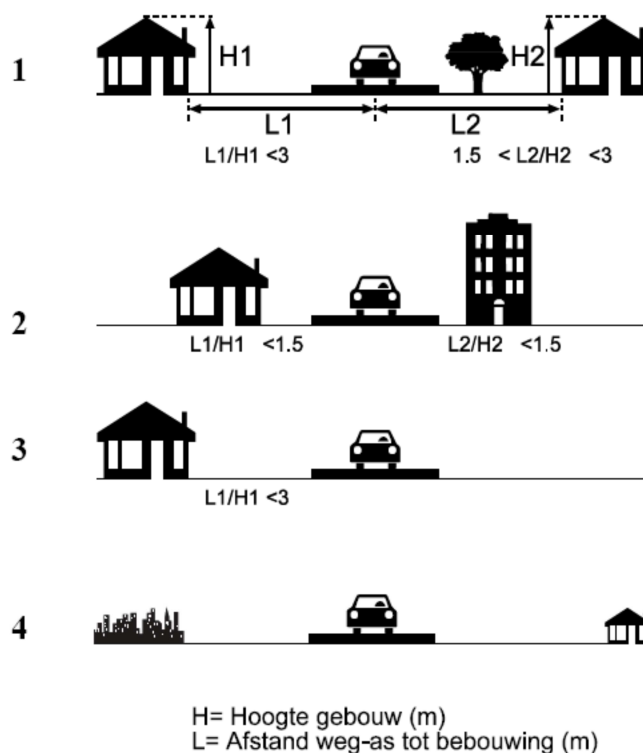
#### 4.4.2 Luchtkwaliteit

Bij de beoordeling van de luchtkwaliteit gaat het om een groot aantal stoffen. In de praktijk zijn met name NO<sub>2</sub> en fijnstof (PM<sub>10</sub>) van belang. Deze stoffen hebben namelijk directe consequenties voor de gezondheid. Ook hiervoor zijn standaard reken- en meetvoorschriften (Handreiking meten en rekenen luchtkwaliteit, VROM 2007, Kenniscentrum InfoMil 2013). En ook hier zijn er twee rekenmethodes: een eenvoudige rekenmethode voor wegen binnen de bebouwde kom en een uitgebreide methode voor wegen buiten de bebouwde kom. Bij deze laatste methode is gedetailleerde informatie nodig over de directe omgeving van de weg.

Als illustratie een korte beschrijving van Standaardrekenmethode 1, die beschikbaar is in het model CAR II en in de NSL Rekentool (Kenniscentrum InfoMil 2013). Bij deze methode wordt onderscheid gemaakt tussen vier typen wegen. De wegtypen worden beschreven aan de hand van de bebouwing langs de weg:

1. beide zijden van de weg min of meer aaneengesloten bebouwing, afstand tussen weg-as en gevel is kleiner dan 3 maal de hoogte van de bebouwing, maar groter dan 1,5 maal de hoogte van de bebouwing;
2. beide zijden van de weg min of meer aaneengesloten bebouwing, afstand tussen weg-as en gevel is kleiner dan 1,5 maal de hoogte van de bebouwing;
3. éénzijdige bebouwing, weg met aan één zijde min of meer aaneengesloten bebouwing op een afstand van minder dan 3 maal de hoogte van de bebouwing;
4. alle wegen in een stedelijke omgeving, anders dan wegtype 1, 2 en 3.

Het zal duidelijk zijn dat bij nauwe straten de luchtkwaliteit al gauw slecht zal zijn: de stoffen kunnen zich immers niet gemakkelijk verspreiden. In het vakgebied wordt dan gesproken van streetcanyons.



FIGUUR 4.9: WEGTYPEN VOOR BEREKENING LUCHTKWALITEIT

De luchtkwaliteit wordt gemeten in concentraties. Voor zowel NO<sub>2</sub> en PM<sub>10</sub> geldt een toegestane concentratie van maximaal 40 µgr/m<sup>3</sup>. De concentratie op een maatgevende afstand uit de weg (5 meter voor NO<sub>2</sub> en 10 meter voor PM<sub>10</sub>) bestaat uit een achtergrondconcentratie en een bijdrage door het wegverkeer. De achtergrondconcentratie bestaat uit emissies van andere bronnen en

natuurlijk aanwezige stoffen, bijvoorbeeld fijne zanddeeltjes of zeezout bij fijnstof. Deze achtergrondconcentraties verschillen hierdoor sterk per locatie. Het Ministerie van Infrastructuur en Milieu stelt jaarlijks een kaart vast met de te hanteren achtergrondconcentraties (de zogenaamde GCN-kaart). De bijdrage van het verkeer wordt berekend met de formule (afhankelijk van de soort stof die wordt beschouwd kan de berekening afwijken):

$$E = \left[ \begin{array}{l} (1 - F_s) \cdot \left( (1 - (F_m + F_v + F_b)) \cdot E_p + F_m \cdot E_m + F_v \cdot E_v + F_b \cdot E_b \right) + \\ F_s \cdot \left( (1 - (F_m + F_v + F_b)) \cdot E_{p,d} + F_m \cdot E_{m,d} + F_v \cdot E_{v,d} + F_b \cdot E_{b,d} \right) \end{array} \right] \cdot \frac{1000 \cdot N}{24 \cdot 3600}$$

VERGELIJKING 4.4

Met:

- $E$  Emissie ( $\mu\text{gr}/\text{m}^3/\text{s}$ )
- $N$  Aantal voertuigen per etmaal
- $F_m$  Fractie middelzwaar vrachtverkeer
- $F_v$  Fractie zwaar vrachtverkeer
- $F_b$  Fractie autobussen
- $E_p$  Emissiefactor voor personenverkeer ( $\text{gr}/\text{km}$ )
- $E_m$  Emissiefactor voor middelzwaar vrachtverkeer ( $\text{gr}/\text{km}$ )
- $E_z$  Emissiefactor voor zwaar vrachtverkeer ( $\text{gr}/\text{km}$ )
- $E_b$  Emissiefactor voor autobussen ( $\text{gr}/\text{km}$ )
- $F_s$  Fractie stagnerend verkeer
- $E_{*,d}$  Emissiefactor voor voertuigklasse \* voor stagnerend verkeer ( $\text{gr}/\text{km}$ )

De te hanteren emissiefactoren per voertuigklasse worden evenals de achtergrondconcentraties jaarlijks door het Ministerie van Infrastructuur en Milieu vastgesteld. Met de berekende emissie kan vervolgens de bijdrage aan de concentratie worden berekend:

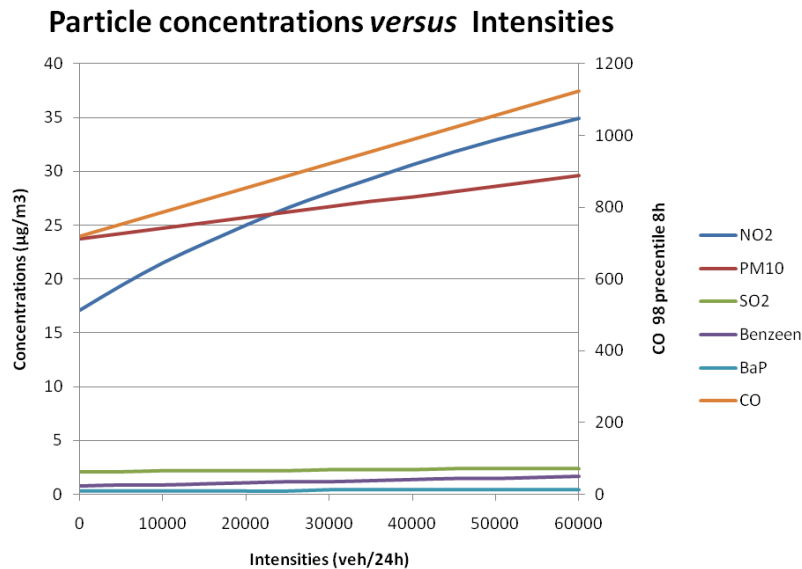
$$C_{jm\text{-bijdrage}} = 0,62 \cdot E \cdot \Theta \cdot F_b \cdot F_{regio}$$

VERGELIJKING 4.5

Met:

- $C_{jm\text{-bijdrage}}$  jaargemiddelde concentratiebijdrage verkeer
- $F_b$  bomenfactor
- $F_{regio}$  regiofactor met betrekking tot meteorologie
- $\Theta$  verdunningsfactor

Kern is dat ook hier gedetailleerde informatie nodig over de soorten verkeer. De relatie tussen luchtkwaliteit en hoeveelheid verkeer is in vergelijking met die voor de geluidsbelasting redelijk lineair (dit geldt in mindere mate voor de gedetailleerde rekenmethode). Belangrijk is te bedenken dat ook de aanwezige achtergrondconcentraties een rol spelen. Sommige regio's zijn daarmee kwetsbaarder wat de bijdrage van het verkeer betreft dan andere. Figuur 4.10 geeft een beeld van het verloop van de concentraties van de diverse stoffen als functie van de verkeersintensiteit.



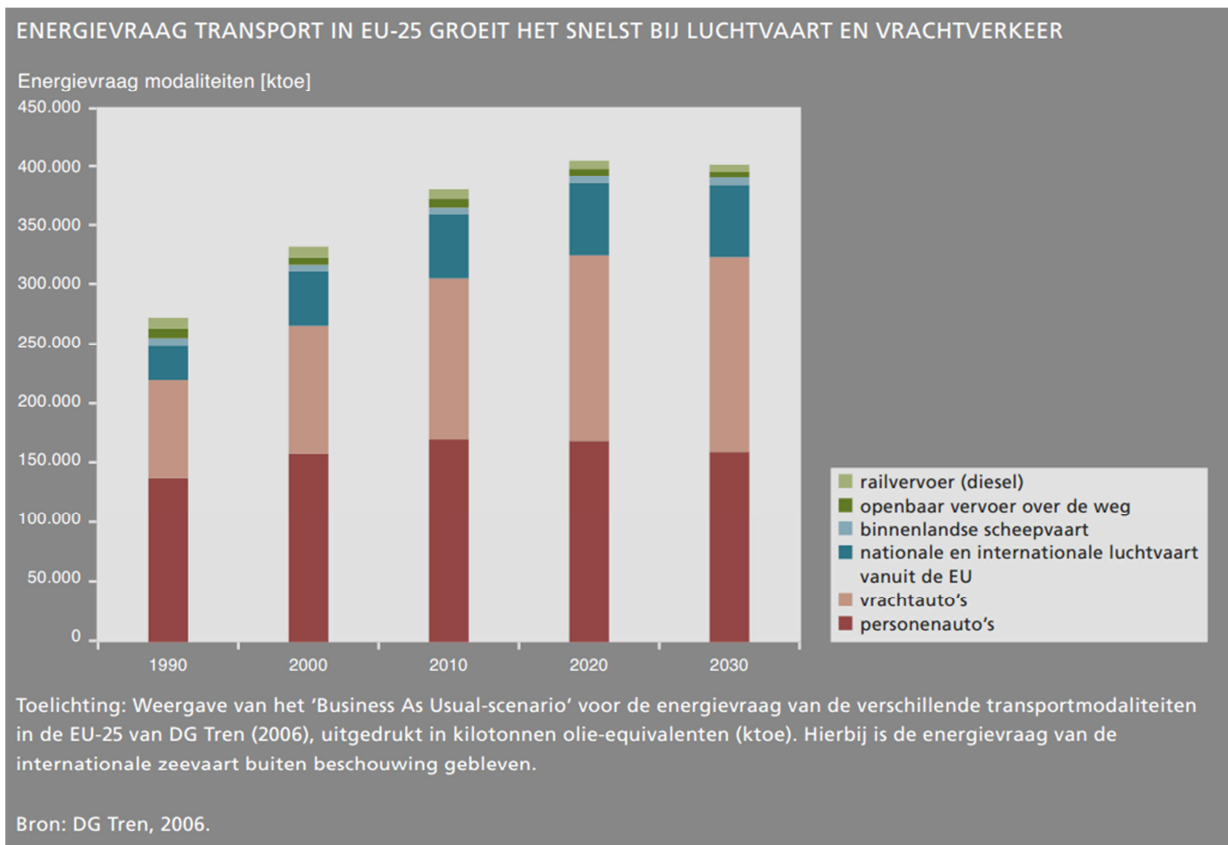
FIGUUR 4.10: VOORBEELD RELATIE TUSSEN INTENSITEITEN EN CONCENTRATIES STOFFEN IN DE LUCHT

De invoering van de regelgeving voor luchtkwaliteit leidde ertoe dat elk infrastructuurproject op de effecten werd beoordeeld. In de Nederlandse uitwerking van de regelgeving zijn de grenswaarden een hard criterium: overschrijding van een grenswaarde betekende dat een project niet door kon gaan. Aangezien deze berekening puur modelmatig is, zowel de prognose voor de benodigde verkeersgegevens (met grote verkeersmodellen zoals NRM's) als de berekening van de concentraties van de stoffen, was de beoordeling van de luchtkwaliteit vaak aanleiding voor juridische procedures (zie ook 4.3.2). Omdat veel projecten elkaar beïnvloeden heeft men ervoor gekozen een nationaal beoordelingskader te ontwikkelen. In het zogenaamde Nationaal Samenwerkingsprogramma Luchtkwaliteit is een systematiek ontwikkeld om ervoor te zorgen dat aan de luchtkwaliteitseisen wordt voldaan. Naast het juridische kader is een belangrijk onderdeel de NSL-Monitor waarin alle gegevens om de luchtkwaliteit te bepalen zijn opgenomen, zowel voor een basisjaar als voor toekomstige jaren. Voor deze toekomstige jaren zijn de geplande projecten uit het MIRT-opgenomen plus geplande maatregelen voor de verbetering van de luchtkwaliteit. Consequentie van deze nationale aanpak is dat als een project in het NSL-programma is opgenomen en daarin is geconstateerd dat aan de eisen wordt voldaan, het project niet nogmaals op luchtkwaliteit hoeft te worden beoordeeld. Op de website van NSL-Monitor (<https://www.nsl-monitoring.nl/monitoring-nsl/inleiding/>) zijn alle benodigde gegevens opgenomen om de luchtkwaliteit te berekenen, inclusief de (verwachte) luchtkwaliteit voor NO<sub>2</sub> en PM<sub>10</sub> in Nederland. Overigens zijn de normen voor fijnstof verder aangescherpt door ook normen vast te stellen voor de kleinere deeltjes bij fijnstof: PM<sub>2,5</sub>. Deze deeltjes zijn schadelijker voor de gezondheid van mensen dan PM<sub>10</sub> en ze zijn grotendeels het resultaat van menselijke activiteiten.

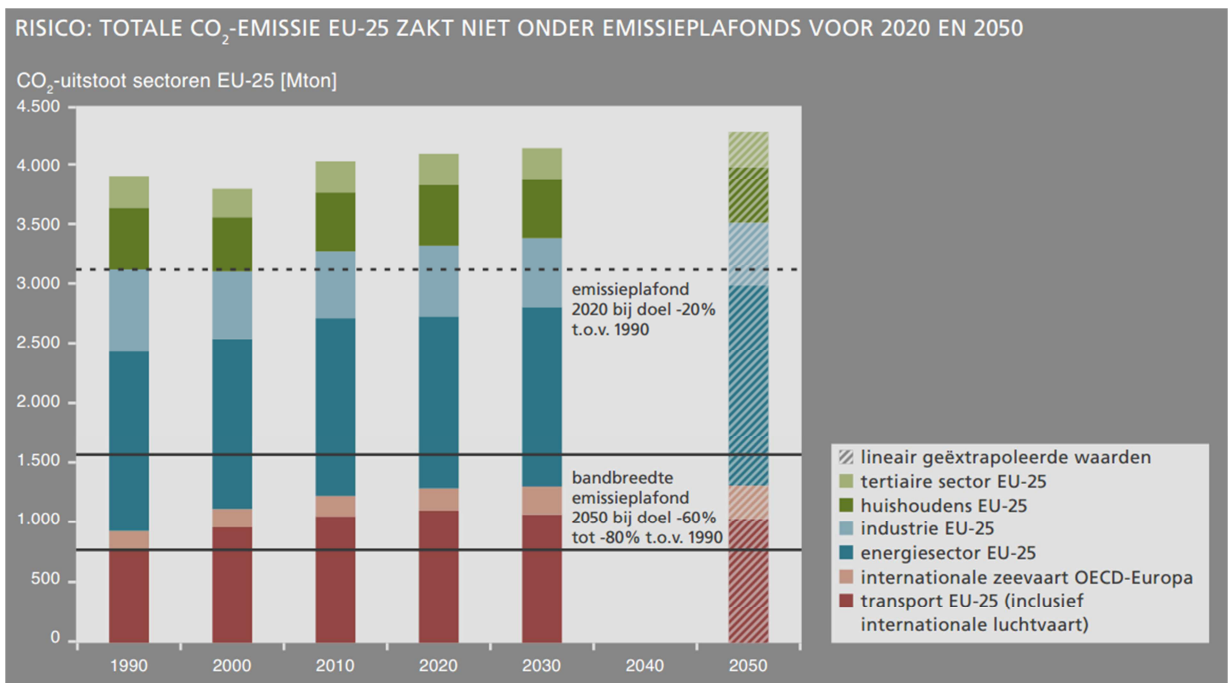
#### Energie en CO<sub>2</sub>

Transport vraagt energie. In de studie Een prijs voor elke reis (Raad voor Verkeer en Waterstaat, VROM-Raad en Algemene Energieraad, 2008) is op Europees niveau aangegeven hoe het energie verbruik is en in de toekomst zal verlopen. Personenauto's en vrachtauto's hebben hierin een groot aandeel. Duidelijk is te zien dat op langere termijn een stabilisatie wordt verwacht en dat de grootste groei is veroorzaakt door luchtverkeer en vrachtauto's.

Het energieverbruik is sterk gecorreleerd met CO<sub>2</sub> uitstoot. Gezien de EU doelen de uitstoot fors te reduceren is dit een belangrijk aandachtspunt. Bij de meest ambitieuze doelstellingen is alleen de uitstoot van transport al meer dan het toegestane niveau.



FIGUUR 4.11: ENERGIEVRAAG TRANSPORT IN EUROPA (RAAD VOOR VERKEER EN WATERSTAAT ET AL. 2008)

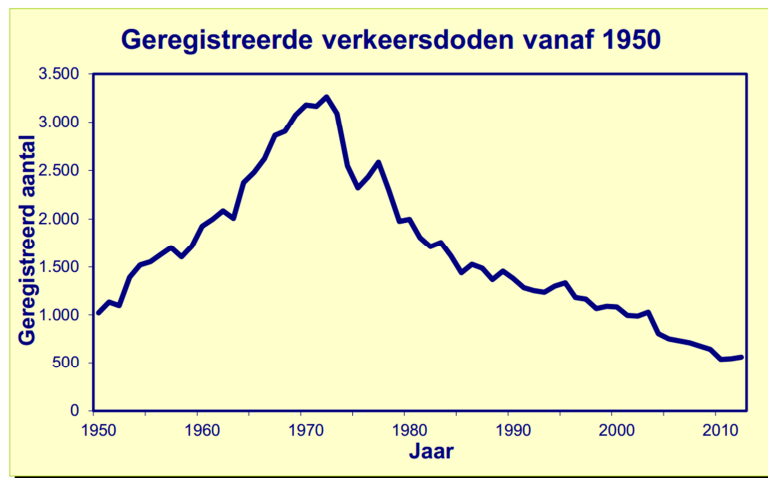


FIGUUR 4.12: VERWACHT VERLOOP CO<sub>2</sub>-EMISSIE VOOR DE EU-25 (RAAD VOOR VERKEER EN WATERSTAAT ET AL. 2008)

Het energieverbruik en de CO<sub>2</sub> uitstoot zijn beide nauw gecorreleerd met het voertuigkilometrage in combinatie met het verbruik respectievelijk de uitstoot van het gebruikte voertuig. Beleid gericht op besparing van energie en reductie van CO<sub>2</sub> richt dan ook op het beperken van het kilometrage van energieverbruikende vervoermiddelen: andere vervoerwijzen, efficiëntere vervoermiddelen, kortere verplaatsingen, andere brandstoffen, etc.

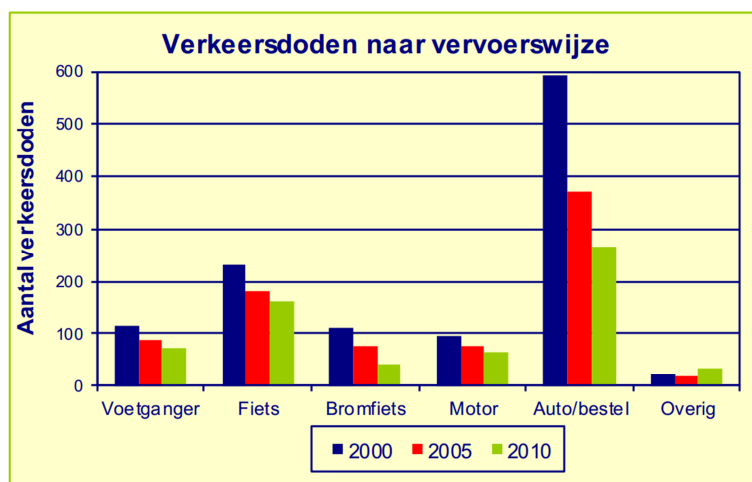
#### 4.4.3 Verkeersveiligheid

Belangrijke indicatoren voor verkeersveiligheid zijn de aantallen verkeersdoden en ernstige verkeersgewonden. De afgelopen jaren hebben beide indicatoren een duidelijke daling laten zien. Gezien de sterk toegenomen mobiliteit is dit een bijzondere ontwikkeling.



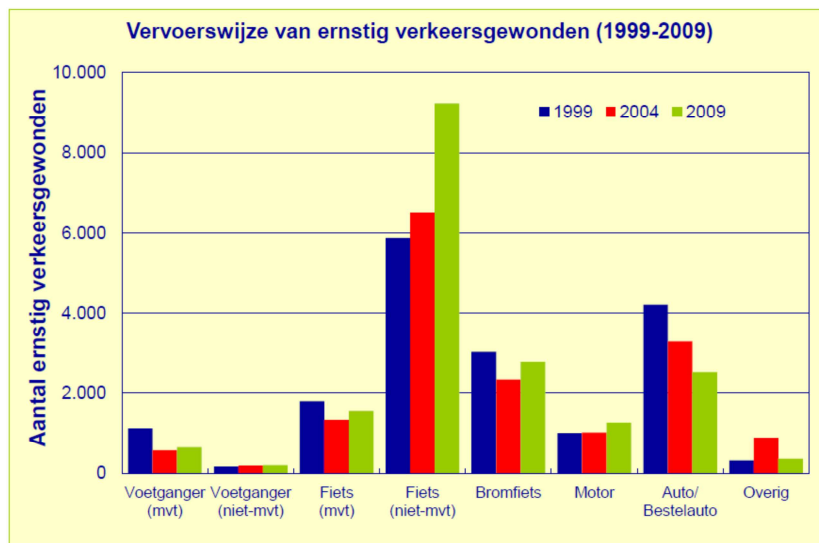
FIGUUR 4.13: GEREGISTREERD AANTAL VERKEERSDODEN 1950-2012 (FACTSHEET VERKEERSDODEN IN NEDERLAND, SWOV, 2013)

Als we kijken naar de verdeling over de vervoerwijzen, dan is duidelijk te zien dat met name de veiligheid van auto's sterk is toegenomen. Bij de ernstige verkeersgewonden is duidelijk de kwetsbaarheid van fietsers te zien. Verder valt op dat er veel fietsongevallen zijn waarbij geen motorvoertuig is betrokken. Toename van E-bikes en eenzijdige ongevallen van bijvoorbeeld ouderen zijn hier mogelijke oorzaken.



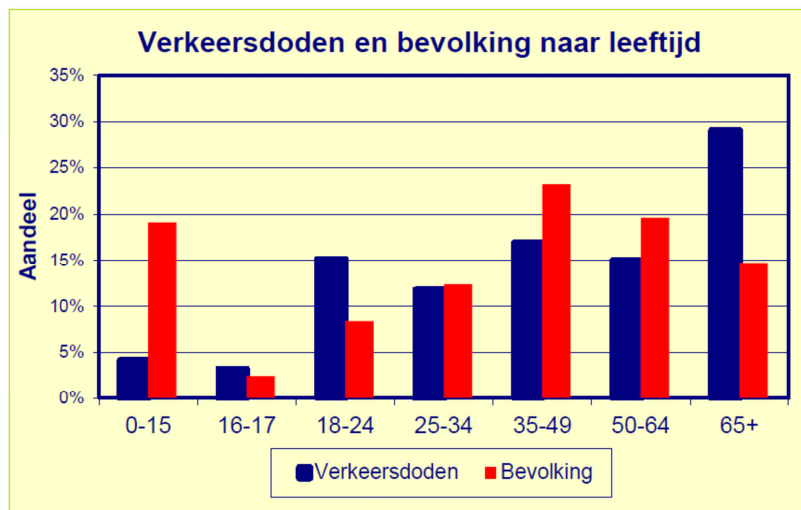
FIGUUR 4.14: AANTAL VERKEERSDODEN ONDERVERDEELD NAAR VERVOERWIJZE SLACHTOFFER (FACTSHEET VERKEERSDODEN IN NEDERLAND, SWOV, 2013)





FIGUUR 4.15: AANTAL ERNSTIG VERKEERSGEWONDEN ONDERVERDEELD NAAR VERVOERWIJZE SLACHTOFFER, BIJ LOPEN EN FIETSEN MET ONDERSCHIED BETROKKENHEID VAN WEL/GEEN MOTORVOERTUIG (FACTSHEET ERNSTIGE VERKEERSGEWONDEN IN NEDERLAND, SWOV, 2013)

Als we kijken naar de onderverdeling van verkeersdoden naar leeftijdscategorie dan zien we dat bij kinderen het aantal slachtoffers relatief laag is. Oorzaak is de lagere mobiliteit van kinderen. Bij ouderen daarentegen zien we een tegenovergesteld beeld. Hier speelt de grotere kwetsbaarheid van ouderen een belangrijke rol. Bij de categorie 18 tot 24 ten slotte is het aandeel slachtoffers hoog doordat in deze leeftijdscategorie veel personen beginnen met autorijden. Hierbij is dus sprake van een combinatie van leeftijd en rijervaring.



FIGUUR 4.16: AANTAL VERKEERSDODEN ONDERVERDEELD NAAR LEEFTIJDSCATEGORIE (FACTSHEET VERKEERSDODEN IN NEDERLAND, SWOV, 2013)

Om bij infrastructuurprojecten het effect op de verkeersveiligheid te berekenen wordt gebruik gemaakt van kengetallen. In deze tabel is een aantal verkeersmaten weergegeven. In de praktijk blijkt de maat aantal ongevallen per miljard voertuigkilometers per wegtype het beste te zijn.

	Aantal ernstige ongevallen	Aantal ernstige ongevallen per 1.000 kilometer weglengte	Aantal ernstige ongevallen per miljard motorvoertuigkilometers
<b>Binnen de bebouwde kom</b>			
<b>30 km/uur</b>	494	18	137
<b>50 km/uur</b>	4.891	162	199
<b>70 km/uur</b>	148	122	31
<b>Buiten de bebouwde kom</b>			
<b>60 km/uur</b>	320	28	238
<b>80 km/uur</b>	2.928	66	52
<b>100/120 km/uur</b>	912	178	22

TABEL 4.1: DE WAARDEN VAN DRIE VERKEERSONVEILIGHEIDSMATEN VOOR ZES WEGTYPEN IN NEDERLAND IN 2003 (FACTSHEET HET METEN VAN DE (ON) VEILIGHEID VAN WEGEN, SWOV, 2009)

#### 4.4.4 Economische effecten

Voor infrastructuurprojecten wordt de Algemene leidraad voor maatschappelijke kosten-batenanalyse (Romijn & Renes 2013) gebruikt. Dit een vernieuwing en veralgemenisering van de Leidraad Economisch Effecten Infrastructuur (OEI). Kern is dat voor een project op een systematische wijze alle aan het project verbonden kosten en de verwachte baten in kaart worden gebracht. Het gaat hierbij niet alleen om puur financiële aspecten zoals inkomsten en uitgaven, maar ook niet monetaire kosten zoals emissie, slachtoffers en reistijdwinsten. Voor de afweging worden deze niet monetaire aspecten zoveel mogelijk omgerekend in Euro's.

In een Kosten-Baten Analyse komen globaal gezien de volgende 5 blokken aan bod:

- **Bereikbaarheid:** Dit blok geeft de directe effecten van het projectalternatief in de vorm van veranderingen in de totale transportkosten van alle verkeersdeelnemers.
- **Veiligheid:** Dit blok geeft de externe effecten van het projectalternatief op aspecten als externe veiligheid en verkeersveiligheid.
- **Leefomgeving:** Dit blok geeft de externe milieueffecten van het projectalternatief.
- **Kosten:** Dit blok geeft aan welke maatschappelijke kosten gemaakt moeten worden om het projectalternatief te realiseren (investering) en te beheren / in stand te houden (beheeren onderhoud).
- **Uitkomst KBA:** Dit blok geeft het saldo van de in geld uitgedrukte baten en kosten in termen van de netto contante waarde. Daarnaast wordt hier de baten-kostenverhouding vermeld; dit is de verhouding tussen de contante waarde van de baten en de contante waarde van de kosten. Tot slot bevat dit blok de interne rentevoet. De interne rentevoet geeft aan wat het maatschappelijk rendement is van investeren in het projectalternatief. Indien deze lager is dan de gebruikte discontovoet is het KBA saldo negatief. Is de interne rentevoet hoger dan de discontovoet dan is het KBA saldo positief.

Bij de bereikbaarheid gaat het primair om de reistijdwinsten die door het project worden gerealiseerd. Met behulp van de reistijdwaardering kunnen deze winsten worden omgerekend in opbrengsten in Euro's. Waar mogelijk worden ook eerder besproken aspecten zoals verkeersveiligheid en leefmilieu meegenomen. De kosten van een project spreken voor zich.

In de Kosten-Baten Analyse worden de te kapitaliseren aspecten in kaart gebracht. Naast de directe baten van de reistijdwinsten, worden ook indirecte baten als gevolg van schaal- en efficiencyvoordelen in beschouwing genomen. In de praktijk blijkt dit vaak lastig definieerbaar te zijn. Enerzijds zijn het vaak aan de directe effecten gelieerde aspecten wat kan leiden tot allerlei dubbelstellingen. Anderzijds gaat het soms om effecten zoals bedrijfsvestigingen die op een klein schaalniveau misschien als toegevoegde waarde kunnen tellen, maar bij een hoger schaalniveau alleen een bedrijfsverplaatsing blijken te zijn. Veelal is het een beperkt bedrag in vergelijking met de directe baten.

Omdat de investeringen voor de baten uitgaan, worden alle inkomsten en uitgaven naar hetzelfde jaar gerekend met behulp van de Netto contante waardeberekening:

$$NCW = \sum_{t=0}^T \frac{(B_t - K_t)}{(1+i)^t}$$

VERGELIJKING 4.6

met:

- NCW* Netto contante waarde
- T* Zichtperiode, voor infrastructuurprojecten wordt vaak 30 jaar genomen
- B<sub>t</sub>* Baten in jaar *t*
- K<sub>t</sub>* Kosten in jaar *t*
- i* Discontovoet

De discontovoet verdisconteert de inflatie en het risico. Voor overheidsprojecten wordt vaak de waarde 5,5% gebruikt. Bij private projecten en bij zeer risicovolle projecten wordt een hogere discontovoet gehanteerd, bijvoorbeeld 10%. Door het gebruik van de discontovoet krijgen investeringen en inkomsten in de toekomst een lagere waardering. Omdat de investeringen incidenteel zijn en de baten jaarlijks terugkeren, kunnen bij een goed project de totale baten hoger zijn dan de investeringen, ook als met de discontovoet wordt gewerkt.

Een dergelijke KBA geeft een netto resultaat van de in geld uit te drukken effecten. In de besluitvorming zal dit resultaat moeten worden afgewogen tegen de resterende niet in geld te kwantificeren effecten.

**Samenvatting van een maatschappelijke kosten-batenanalyse voor een fictief project**

Bedragen in netto contante waarden

	Financieel	Betreft
<b>BATEN</b>		
Directe effecten		
- Exploitatie-inkomsten	€ 3 à 4 mld	
- Voordelen voor reizigers	€ 2,25 à 3 mld	75 à 100 mln uur reistijd
Indirecte/strategische welvaartseffecten	€ 0 à 2 mld	schaal- en efficiëntievoordelen
Milieu: vermeden emissies	€ 0,25 à 0,5 mld	2 à 4 Mton CO2
Totaal baten	€ 5,5 à 9,5 mld	
<b>KOSTEN</b>		
Directe effecten		
- Investering	€ 4 à 4,5 mld	
- Onderhoud	€ 1 mld	
- Exploitatie	€ 1 mld	
Totaal kosten	€ 6 à 6,5 mld	
<b>Saldo</b> (baten min kosten)	€ -1 à +3,5 mld	
Rendement	3,5 à 10%	
<b>PM POSTEN</b>		
Verdelingseffecten (tussen regio's)	+PM1	10% kleiner inkomensverschil
Landschap en hinder	-PM2 500	ha 1000 gehinderden

VOORBEELD 4.1: OEI ANALYSE (NAAR EVALUATIE VAN INFRASTRUCTUURPROJECTEN; LEIDRAAD VOOR KOSTEN-BATENANALYSE, NEI, 2000)

