

MACROSCOPISCHE MODELLEN VOOR DE BESCHRIJVING VAN KORTE- EN LANGE-TERMIJN-
TRENDS IN HET VERKEER EN DE VERKEERSVEILIGHEID

R-91-18

Drs. S. Oppe

Leidschendam, 1991

Stichting Wetenschappelijk Onderzoek Verkeersveiligheid SWOV

SAMENVATTING

Dit rapport geeft een samenvatting van onderzoekresultaten die zijn neergelegd in een serie Engelstalige publikaties.

De ontwikkelingen in het verkeer en de verkeersveiligheid worden beschreven als het resultaat van een zich ontwikkelend systeem. Vanuit enkele eenvoudige theoretische aannamen zijn modellen afgeleid die de ontwikkelingen vanaf de tweede wereldoorlog tot nu toe doeltreffend beschrijven. Daarnaast levert deze weergave een aantal interessante nieuwe feiten op. Er wordt slechts een macroscopische beschrijving gegeven van de ontwikkelingen door de tijd en geen procesmatige verklaring. Met andere woorden, er wordt beschreven hoe verkeer en verkeersveiligheid zich ontwikkelen onder invloed van algemene sociaal-economische processen, maar niet welke specifieke processen dit macroscopische effect verklaren. Wel volgen uit deze beschrijving verwachtingen over toekomstige ontwikkelingen.

De ontwikkeling van het gemotoriseerde verkeer wordt opgevat als het resultaat van een maatschappelijk productieproces. Een van de belangrijkste kwaliteitsaspecten van dit proces is de verkeersveiligheid. Als maat voor de kwaliteit van het verkeerssysteem is gekozen voor het dodenquotiënt, het aantal doden per afgelegde kilometer. Hoewel het aantal doden, naast de hoofddoelstelling van verkeersproductie, de belangrijkste indicator is voor de uiteindelijke kwaliteit van het productiesysteem, wordt het dodenquotiënt beschouwt als de belangrijkste indicator voor de procesbeheersing.

De modellen blijken flexibel genoeg om de ontwikkelingen in het verkeer en de verkeersveiligheid in zes ontwikkelde landen te beschrijven. Verklaard wordt waarom er in de jaren zeventig plotseling sprake was van een daling in de aantallen doden, na een voortdurende toename over een lange reeks van jaren. Ook wordt zichtbaar gemaakt dat de energiecrisis in de jaren zeventig eerder veroorzaakt lijkt door de culminerende vraag naar olie van de westerse industrielanden dan door de erop volgende actie van de olieproducerende landen. De modellen laten verder zien dat er een rechtstreekse relatie is tussen de ontwikkeling van het verkeer en de veiligheid. De ontwikkeling van de veiligheid volgt die van het verkeer met een vertraging van ongeveer tien jaar en is te beschrijven als een functie van de afgeleide ervan in mathematische zin.

De modellen beschrijven de globale ontwikkeling van verkeer en veiligheid. Naast deze globale ontwikkeling is er sprake van incidentele schommelingen

zowel in de groei van het verkeer als in die van de veiligheid. Aangetoond wordt dat ook de modelafwijkingen van beide ontwikkelingen aan elkaar zijn gerelateerd. De combinatie van beide effecten "verklaart" meer dan 90% van de variantie in het aantal doden uit de hoeveelheid verkeer.

Tenslotte wordt een korte samenvatting gegeven van een theoretische verdieping die leidt tot een meer algemeen omvattend beschrijvingsmodel voor verkeer en veiligheid.

INHOUD

1. De wet van Smeed
2. Een alternatieve benadering
3. De modellen
4. De resultaten
5. Modelassumpties en systematische afwijkingen van het model
6. Theoretische verdieping
7. Samenvatting en conclusies

Afbeeldingen 1 t/m 11

Tabellen 1 en 2

1. DE WET VAN SMEED

In 1948 hield Reuben J. Smeed een lezing voor de Royal Statistical Society in Engeland, waarin hij de ontwikkeling van de verkeersveiligheid in een groot aantal landen sinds het begin van de twintigste eeuw vergeleek (Smeed, 1949). Norman (1962) vermeldt dat de eerste twee verkeersdoden in Engeland vielen in 1896 en de eerste dode in de Verenigde Staten in 1899. Smeed geeft dus een terugblik vanaf het moment dat er problemen zijn gesignaleerd met het gemotoriseerde verkeer. Hij liet een verband zien tussen de aantallen doden, de aantallen voertuigen en de omvang van de populatie. Hij vond constante waarden voor de parameters A , α en β van de regressievergelijking $D=A \cdot N^\alpha \cdot P^\beta$, waarin D het aantal doden, N het aantal voertuigen en P het aantal inwoners aangeeft. Als waarden voor de parameters vond hij bij benadering $A=0.00030$, $\alpha=1/3$ en $\beta=2/3$. Hieruit leidde hij zijn beroemde formule $D=0.00030(NP^2)^{1/3}$ af, die bekend staat als "Smeed's law". Smeed zelf sprak niet van een wet, maar van "...an easily remembered, but quite good approximation to the above formula." (Smeed, 1949, blz. 6). In dezelfde lezing gaf hij ook een meer theoretische beschrijving van het aantal doden, afgeleid van expositiegrootheden. Daarin komt hij tot het volgende model: $D=aN+bN^2+cNP$. Hij maakt zelf geen verdere vergelijking tussen de beide modellen. Ruim twintig jaar later geeft Smeed een hernieuwde presentatie van zijn regressievergelijking, nu gebaseerd op statistieken van zeer veel landen (Smeed, 1972).

Vanaf het begin is er veel kritiek geweest op Smeed's law. Bij de presentatie in 1948 wijst Sir Maddex al op de discrepantie tussen de twee formules die Smeed presenteerde en voegt daaraan toe: "Unless accident rates can be derived related to an appropriate and significant denominator, we are in danger of accumulating collection of facts, interesting in themselves, no doubt, but unmanageable and embarrassing." (Smeed, 1949, blz. 24). Smeed antwoordt dat "... we must be guided by the data and not by our preconceived ideas." (Smeed, 1949, blz. 32). Ook later is er veel kritiek geweest op Smeed's law. Na een felle aanval, waarin hij met name ingaat op het ontbreken van een conceptuele basis, concludeert Peranio (1970) : "Instead of attempting to find weak or irrelevant functional relationships, those of us interested in describing and comparing accident statistics should decide upon the criteria for comparison. Two rates that may be used are accidents per unit of travel and accidents per unit of popula-

tion. When plotted graphically over a period of years in conjunction with other data (such as density of road traffic) we obtain a useful tool for establishing trends and analyzing accident patterns." Daarna geeft hij aan aan welke vereisten mathematische formules moeten voldoen om ze te kunnen gebruiken. Smeed (1972) antwoordt: "... No suggestion was made in the paper that the formula could be used for prediction,..." (blz. 305). Even verder echter stelt Smeed: "Peranio's third attribute that a formula should give insight into phenomena it describes is also satisfied. It suggests a theory of road accident frequency and it is very useful to know that for every country for which data are available over a long period the percentage increase in road fatalities is much less than the percentage increase in road vehicles..." (blz. 309). Hieruit blijkt wel dat Smeed zijn formule toch als iets meer zag dan een goede benadering van zijn regressieformule.

Ook na het overlijden van Smeed hield de kritiek aan. Andreassen (1987) merkt op dat Smeed's resultaten vertekend worden door diens wijze van presenteren. Smeed presenteert plots van D/N, D/P en N/P; volgens hem tonen deze plots: "...considerable evidence of relations between D/N, D/P, N/P - much greater than would be expected if D, N and P were uncorrelated..." (Smeed, 1949, blz. 4). Andreassen wijst er terecht op dat, ook al zouden D en N ongecorrleerd zijn, D/P en N/P dan nog hoog zouden correleren, omdat ze door dezelfde noemer zijn gedeeld.

Een van de belangrijkste verdedigers van Smeed is Adams. In zijn boek (Adams, 1985) vermeldt hij dat Smeed kort voor zijn dood een (niet verschenen) publikatie voorbereidde, waarin het verloop van het dodenquotiënt (het aantal doden per afgelegde voertuigkilometer) over de tijd werd beschreven. Adams gebruikt een lineaire benadering van de logaritme van deze trend in combinatie met het aantal afgelegde voertuigkilometers en voorspelt zo het stijgende en dalende verloop van het aantal ongevallen in Engeland. Hij laat dus eigenlijk zien hoe goed de logaritme van het dodenquotiënt door de rechte wordt benaderd. In een artikel interpreteert Adams (1987) de curven van het dodenquotiënt in Engeland en de Verenigde Staten als "national learning curves". Hij bedoelt daar echter het feitelijk leren omgaan van de weggebruikers met het verkeer mee en niet het effect van genomen veiligheidsmaatregelen en voorzieningen: "It is often argued that the long-term decline in death rates per vehicle (or per vehicle kilometre) ought to be attributed not to learning but to the large

number of safety measures which have been implemented as traffic has increased. There are a number of reasons to doubt this" (blz. 73). Het is bekend dat Adams niet zo'n hoge dunk heeft van het effect van maatregelen. Hij is aanhanger van de risico-homeostasetheorie van Wilde (1982). Wilde komt op basis van overigens zinnige concepties als risicocompensatie, -acceptatie en -adaptatie tot de merkwaardige bewering dat de verkeersdeelnemer streeft naar een constant niveau van risico. Uitgangspunt voor zijn theorie is dat een ingebouwde risicothermostaat zorgt voor dit constante niveau. De redenering erachter is ongeveer dezelfde als wanneer men uit de constatering dat iemand elke maand geld opneemt als zijn salaris op zijn bankrekening wordt gestort, concludeert dat dit gebeurt om de verstoring in saldo weer ongedaan te maken (en verdere stortingen dus ook geen zin meer hebben). Volgens Wilde's theorie zullen we in de toekomst zeer veel meer moeten gaan reizen om aan onze dagelijkse portie risico te komen. Wel heeft Adams gelijk dat in het algemeen het effect van maatregelen wordt overschat. Hij geeft daarvan in zijn boek een aantal voorbeelden. Hij signaleert daarin verder dat fluctuaties in de groeisnelheid van het verkeer lijken samen te hangen met fluctuaties in de veiligheid, iets waarop we later nog zullen terugkomen: "During years in which traffic increased by more than 4.7 per cent road death tended to increase, and during years in which traffic increased by less than 4.7 per cent they tended to decrease." (blz. 105).

Minter (1987) beschrijft het dodenquotiënt eveneens als leercurve. Ook voor hem gaat het dan om het leren van de weggebruiker. Hij vergelijkt twee leercurven en laat zien dat uitspraken over elementen die een rol spelen in de wet van Smeed, namelijk over de relatie tussen D/N en N/P, overeenstemmen met het leermodel van Wright (Minter, 1987, blz. 75). Hij negeert daarbij het probleem dat de vorm waarin de wet van Smeed is neergelegd geen daling van het aantal doden toelaat bij een niet-dalend aantal voertuigen en inwoners. Overigens kiest hij zelf voor het alternatieve leermodel van Towill. Adams (1987) noemt zijn beschrijving van het aantal doden als het produkt van een leercurve en het aantal voertuigkilometers een aanpassing van de wet van Smeed, maar ook hij geeft niet aan wat de relatie met deze wet is. Het probleem zit echter niet in het verloop van D/N die zou moeten worden vervangen door het dodenquotiënt zoals Adams lijkt te suggereren, maar in het verloop van D/P.

Haight (1984) vergelijkt het verloop van het dodenquotiënt en van D/P. Hij gebruikt het beeld van een "paardenrace" om de relatie tussen de behoefte

aan veiligheid en de behoefte aan mobiliteit te beschrijven. Hij geeft de volgende verklaring: "The main difference between this paper and other explanations for the recent decline in the per capita fatality is that others assume that the horse called "safety" has put on a burst of speed, while I hope to suggest that maybe it is the horse called "travel" which is at last beginning to falter." (blz. 138). Met andere woorden, de vermindering van het aantal doden in de jaren zeventig is eerder een gevolg van de verzadiging van de mobiliteitsbehoefte dan van een toename in activiteiten op het gebied van de veiligheid.

Het hierna beschreven model kan worden gezien als een combinatie van het door Adams en Minter genoemde collectieve leren (maar dan ruimer geïnterpreteerd) en modellering van de door Haight genoemde ontwikkeling van de mobiliteit. De engere interpretatie, als zou het leren uitsluitend een gevolg zijn van het leren van de weggebruikers, lijkt niet houdbaar. Er is inderdaad aanvankelijk sprake van een snelle afname van het dodenquotiënt met leeftijd en rijervaring, maar op latere leeftijd neemt het quotiënt weer toe. Dit gekoppeld aan het verloop van de samenstelling van de bestuurderspopulatie verklaart wel een aanvankelijke collectieve daling. Deze daling zou echter allang gestabiliseerd moeten zijn en met de vergrijzing van de bestuurderspopulatie weer zijn gaan stijgen. Dit is in strijd met de gevonden continue daling sinds de tweede wereldoorlog. Wel is het zo dat de collectieve bijdrage van de rijervaring aan de aanvankelijke daling relatief groot zal zijn geweest en mag worden aangenomen dat door de afnemende bijdrage daarvan de collectieve inspanning van de maatschappij als geheel moet toenemen om het bereikte effect te continueren.

Tot de jaren zeventig was het gebruikelijk het aantal doden vooruit te voorspellen met een lineaire-regressievergelijking. Sinds de tweede wereldoorlog nam het aantal doden nagenoeg lineair toe. In het begin van de jaren zeventig echter trad er plotseling een daling op in het aantal verkeersdoden. Deze daling was dermate onverwacht dat een specifieke verklaring nodig werd gevonden. Aanvankelijk werd deze gezocht in het effect van de energiecrisis. Het vreemde was echter dat deze daling zich over de gehele linie voordeed, zowel binnen als buiten de bebouwde kom en niet vooral daar waar een groot effect mocht worden verwacht als gevolg van de energiecrisis, zoals bij de hoogste snelheidsreducties. Ook bleef de daling aanhouden toen de energiecrisis was afgelopen.

Zoals gezegd was volgens de wet van Smeed een daling van het aantal doden eveneens onverklaarbaar bij een stijging van het aantal voertuigen en een niet dalend aantal inwoners. Wel was een minder dan lineaire stijging te verwachten, maar zeker geen daling. De onverklaarbare daling van het aantal doden rond 1974 betekende voorlopig het einde van prognoses op basis van lineaire regressie en tevens van de wet van Smeed.

Broughton (1988) bestrijdt dan ook de opvatting dat de formule van Smeed als wet kan worden opgevat. Hij concludeert aan het eind van zijn artikel dat hij "... has demonstrated unequivocally that the relation detected by Smeed among data from 1938 has no general validity. ... A relation was identified among data for a range of countries in 1970 and 1984: it is not the relation that Smeed found, and it is time dependent. ... A satisfactory model was developed in this way for fatality rates per vehicle and per vehicle-km... The major source of uncertainty in forecasting totals lies in predicting traffic growth, which is much less certain than the change in accident rates." (Broughton, 1988, blz. 300).

Smeed (1962) geeft een voorspelling van het aantal voertuigen per inwoner. Hij volgt hierin Tanner (1958) die de ontwikkeling van het aantal voertuigen beschrijft met een logistische functie. Ook in dit artikel legt Smeed echter geen relatie met de factor D/N uit zijn formule, hetgeen toch voor de hand zou liggen. Nu, ruim veertig jaar na de eerste presentatie van de wet van Smeed lijkt de betovering te zijn doorbroken en lijkt de kritiek van Maddex gerechtvaardigd te worden. Gegevens spreken niet voor zichzelf, maar geven slechts antwoord op (zinnige of onzinnige) vragen die er vanuit een model aan worden gesteld.

In de jaren tachtig zijn er opnieuw een groot aantal verklaringen gegeven voor de ontwikkeling van de verkeersveiligheid in diverse landen. Reeds genoemd is de aanpak van Adams en van Minter. Een kritische beschouwing van een aantal benaderingen is te vinden in Hakim et al. (1989). Oppe (1989) noemt een aantal andere. Een uitgebreide behandeling van modellen ter verklaring van het dodenquotiënt in de U.S.A. is te vinden bij Zlatoper (1989). Verschillende grootheden worden daarbij gebruikt, maar vooral het aantal voertuigkilometers. Deze maat lijkt meer toepasselijk dan de door Smeed gekozen maat. We moeten echter niet vergeten dat in de tijd van Smeed dergelijke statistieken nog niet beschikbaar waren. Achteraf is het wat gemakkelijk om kritiek uit te oefenen op het werk van Smeed. Het is waar dat zijn formule slechts stoelt op een regressieverge-

lijking die niet berust op theoretische overwegingen en dat deze uiteindelijk ook misleidend bleek te zijn. Zijn poging om de veiligheid te beschrijven op macroscopisch niveau, in termen van aantallen voertuigen en inwoners en te trachten vergelijkingen tussen verschillende landen te maken, was echter baanbrekend. De ontwikkeling van het hier beschreven model zou zonder zijn baanbrekende werk niet mogelijk zijn geweest.

2. EEN ALTERNATIEVE BENADERING

In het begin van de jaren zeventig werden we ook in Nederland geconfronteerd met de onverwachte daling in het aantal ongevallen. Hoewel het in die tijd nog absurd leek dat er voor zo'n significante verandering in de veiligheid geen verklaring kon worden gegeven, kon deze toch niet worden gevonden. Deze situatie was echter niet uniek voor ons land. Ook in andere landen deed zich hetzelfde verschijnsel voor. Maar ook daar slaagde men er niet in een verklaring te geven. Aanvankelijk stelde men zich tevreden met een benoeming in plaats van een verklaring: de daling werd toegeschreven aan de energiecrisis. Maar, zoals gezegd, een echte verklaring van het energiecrisiseffect kon noch in Nederland noch daarbuiten worden gevonden. Deze werd ook minder aannemelijk toen de daling zich bleek voort te zetten ook nadat de energiecrisis allang was beëindigd. Naarmate men meer begon te wennen aan de veranderde situatie, werd de behoefte aan een specifieke verklaring minder. Mensen, inclusief wetenschappers, zoeken vooral verklaringen voor (onverwachte) veranderingen in ontwikkelingen en hebben in het algemeen minder oog voor op zich even merkwaardige continu verloopende trends.

Dan tonen Blokpoel (1982) in Nederland en Appel (1982) in Duitsland, onafhankelijk van elkaar, gelijksoortige beelden van de ontwikkelingen in het verkeer en de verkeersveiligheid. Afbeelding 1 laat de grafieken van Blokpoel zien, waarin zowel de ontwikkeling van de aantallen verreden voertuigkilometers als die van de aantallen doden en van de aantallen doden per verreden voertuigkilometer zijn afgebeeld. Uit de afbeelding blijkt dat de ontwikkelingen van het verkeer en van het dodenquotiënt, in tegenstelling tot die bij het aantal doden, sinds de tweede wereldoorlog continu verlopen. De curve voor het aantal voertuigkilometers heeft een monotoon stijgend verloop, waarin een relatief kleine invloed te zien is van de energiecrisis. De curve voor het dodenquotiënt is monotoon dalend, zonder noemenswaardige onderbrekingen. Van een ingrijpende verandering in het dodenquotiënt in het begin van de jaren zeventig is geen sprake. Het zien van de continu dalende grafiek van het dodenquotiënt maakte duidelijk dat er slechts sprake was van een schijnbare ombuiging in de verkeersveiligheid zoals leek af te leiden uit de curve voor het totale aantal doden. Niet het aantal doden is het juiste criterium voor de beoordeling van de verkeersveiligheid, maar het verkeersrisico, hier uitgedrukt in het aantal doden per afgelegde voertuigkilometer.

Sinds de tweede wereldoorlog is er een continue daling van het aantal doden per eenheid van verplaatsing, als gevolg van de continue zorg die is besteed aan de verkeersveiligheid. Nadere analyse laat zien dat hoewel de mobiliteit gedurende de jaren zeventig en tachtig nog steeds toenam, het groeitempo toch sterk afnam ten opzichte van de voorafgaande periode. De analyse van Haight, dat niet zozeer een verhoogde inspanning van de veiligheid, maar een verlaagde groei van de mobiliteit oorzaak is van de daling in het aantal ongevallen, lijkt inderdaad op te gaan, althans voor de geïndustrialiseerde landen.

Het totale aantal doden neemt eerst toe bij een explosief stijgend aantal voertuigkilometers en later af bij een meer gematigde groei. De stijging en daling van het aantal doden is een resultante van twee continue processen: een continu stijgende verkeersprestatie en een continu dalend risico, die met elkaar vermenigvuldigd het totale aantal doden opleveren. Bij deze beschouwing van het verkeer en de verkeersveiligheid blijkt er geen bijzondere verklaring meer nodig voor de plotselinge daling in het aantal doden rond 1974; wat zich na 1974 afspeelt is onderdeel van dezelfde ontwikkeling als dat wat zich daarvoor had afgespeeld.

Het verkeer lijkt zich op eenzelfde wijze te ontwikkelen als industriële productieprocessen. Bij een continu toenemende productie neemt eveneens de efficiëntie van deze productie toe. In dit geval echter lijkt het productieproces niet te berusten bij een bepaalde onderneming, maar bij de maatschappij als geheel. De gehele maatschappij neemt deel aan het productieproces en eveneens aan de verbetering van de efficiëntie ervan. De maatschappij leert als producent bij de toename van de productie van het verkeer hoe te zorgen voor een betere infrastructuur van wegen en voertuigen, voor betere verkeersregels, een betere wetgeving, verkeersopleiding enz. en als consument hoe veiliger gebruik te maken van deze voorzieningen.

Bij een onderneming zijn niet de totale produktiekosten de te beheersen factor, maar de kosten per eenheid van produktie. Natuurlijk bepalen de totale kosten wel weer de winst-en-verliesrekening, maar ze zijn geen directe norm voor de produktiebeheersing. Evenzo wordt de acceptatie van de kosten van het verkeerssysteem door maatschappij en beleid wel bepaald door het totale aantal doden, maar kan de kwaliteit van het verkeerssysteem slechts worden uitgedrukt in en beheerst vanuit relatieve maten als het aantal doden per afgelegde kilometer.

Vergelijking van de ontwikkeling van het gemotoriseerde verkeer met een industrieel produktiesysteem suggereert toepassing van op dat gebied gebruikte modellen voor de beschrijving van de ontwikkeling van het verkeerssysteem. In de econometrie wordt de ontwikkeling van de produktieomvang vaak beschreven als een S-vormig verband (zie bijvoorbeeld Mertens, 1973). Bij een goed en gewild produkt gaat er aanvankelijk een zekere zuiging uit van de markt, die zich uit in een snelle groei van de omzet. Daarna, als er verzadiging van de markt optreedt, neemt de groei af en bereikt de omzet een bepaald plafond. Verschillende S-vormige curven zijn toegepast op dergelijke produktieprocessen. Het eenvoudigste en meest gebruikte model voor de beschrijving ervan resulteert in toepassing van de logistische curve.

Wanneer we te maken hebben met een nieuw produktieproces, dan zal gedurende de groeiperiode tevens sprake zijn van verbetering van het produktieproces. De onderneming als geheel leert steeds beter te produceren en iedere werknemer levert daaraan zijn specifieke bijdrage. Collectief leren is niet direct te vertalen in individuele leerervaringen. Een voetbalteam gaat als team beter spelen als de teamleden beter leren samenspelen. Er is sprake van collectieve in plaats van individuele leerdoelen. Verhoging van de precisie van de lange trap van de middenvelder heeft alleen zin als de aanvallers daarop anticiperen. Zo leert ook een onderneming beter produceren door verbeteringen aan te brengen in een complex geheel van in elkaar grijpende produktiefactoren, -middelen en -methoden. Dit geldt eveneens voor de maatschappij als geheel.

Ook bij de ontwikkeling van het moderne verkeer is er sprake van collectief leren: verbetering van de infrastructuur, voertuigen, voorzieningen, gebruikswijzen en gebruiksvoorschriften. De hier gegeven interpretatie van het begrip collectief leren is ruimer dan die van Adams en Minter. Zij beschrijven de afname van de onveiligheid als het gevolg van optimalisering van individuele doelen. Hier gaat het om de optimalisering van collectieve doelen.

Binnen de mathematische psychologie zijn modellen ontwikkeld die het verloop van leerprocessen voor individuen beschrijven (zie bijvoorbeeld Sternberg, 1967). Het eenvoudigste en meest toegepaste leermodel is het lineaire operatormodel, ook wel de negatief exponentiële leercurve genoemd. Soms wordt dit model ook toegepast bij de beschrijving van collectief leren en om de efficiëntie van produktieprocessen weer te geven.

Zulke beschrijvingen zijn macroscopisch van aard. Het gaat om de uitkomst van een groot aantal factoren op het totale produktieproces. Allerlei verbeteringen in de wijze van produceren, aan machines, de bediening ervan etc. zorgen samen voor een verhoging van de produktie, een verlaging van de kosten en een verbetering van de kwaliteit. Belangrijk in deze opvatting is dat alle activiteiten gericht zijn op het collectieve doel: verbetering van de totale produktie. Een macroscopische beschrijving van het verkeer, opgevat als produktiesysteem richt zich dan ook niet op een verklaring van de produktieverbetering door toedoen van de differentiële verbeteringen, maar beschrijft slechts het verloop van het totale beoogde resultaat. Wat op het geaggregeerde niveau plaatsvindt behoeft niet te worden teruggevonden op gedisaggregeerd niveau. Soms wordt vooral aandacht besteed aan de veiligheid van het langzame verkeer, de jongere in het verkeer of de oudere, soms aan de veiligheid op wegen buiten de bebouwde kom. Specifieke maatregelen kunnen dan ook op deelgebieden een trendbreuk te zien geven voor de dodenquotiënten, terwijl toch het totale dodenquotiënt continu daalt als resultaat van alle inspanningen. Belangrijk voor deze macroscopische beschrijving is de veronderstelling dat ook zonder een gedetailleerde analyse van de procesvariabelen, toch een beeld kan worden gegeven van de ontwikkeling van het totale verkeerssysteem. Heel algemeen gesproken kan het verkeersrisico, het totale verwachte verlies aan veiligheid van het verkeerssysteem, op macroniveau worden beschreven als combinatie van:

- een frequentieverdeling voor het verkeer,
- een kansverdeling voor het gevaar en
- een verliesfunctie voor een ongeval.

In de nu volgende modellen zullen de eerste twee aspecten in relatie tot de tijd beschreven worden. Als maat voor het laatste aspect is gekozen voor het aantal doden. In één beschrijving zijn de modellen ook toegepast op gewonden.

3. DE MODELLEN

Het lineaire operatormodel dat bijvoorbeeld wordt toegepast, om aan te geven hoe mensen een bepaald aantal woordjes leren, gaat ervan uit dat bij elke leerpoging de kans om een bepaald woord te leren constant is en verder dat men eenmaal geleerde woorden blijft kennen. In dat geval is het aantal woorden dat bij iedere leerpoging wordt vastgelegd, gemiddeld genomen, evenredig met het aantal te leren woorden en neemt dus het aantal woorden dat per poging wordt bijgeleerd af naarmate men meer woorden weet. Deze simpele veronderstelling blijkt in een groot aantal situaties verrassend goed op te gaan. Indien we dit model toepassen op het collectieve leren omgaan van de maatschappij als geheel met de verkeersveiligheid, dan betekent dit dat wordt aangenomen dat het aantal bijdragen aan de verkeersveiligheid evenredig is met de hoeveelheid voor verbetering in aanmerking komende situaties. In het begin vindt dan een relatief snelle verbetering plaats. Deze verbetering neemt steeds meer af totdat er niets meer te verbeteren valt. Wiskundig gezien kunnen we deze aanname vertalen in een differentiaal vergelijking.

We zullen met F_t het aantal doden in jaar t aangeven, met V_t het aantal door het gemotoriseerde verkeer afgelegde voertuigkilometers in dat jaar en met V_m het maximale aantal voertuigkilometers waarnaar het verkeerssysteem toegroeit. We gebruiken verder de volgende definities: $R=F/V$, $S=V/(V_m-V)$ en $T=F/(V_m-V)$.

De hierboven omschreven aanname luidt dan als volgt:

$$R_t' = \frac{dR_t}{dt} = \alpha \cdot R_t \quad (1)$$

De verandering in R , uitgedrukt in de afgeleide van R , verandert dus evenredig met R . De evenredigheidsconstante is α . Uit deze aanname kan direct worden afgeleid, door gebruik te maken van de quotiëntregel van het differentiëren, dat dan ook geldt:

$$d[\ln(F_t)]/dt = \frac{F_t'}{F_t} = \alpha + \frac{V_t'}{V_t} = \alpha + d[\ln(V_t)]/dt \quad (2)$$

De afgeleide van de logaritme van F is onder de aanname van (1) dus gelijk aan de afgeleide van de logaritme van V plus een constante, hetgeen laat zien dat met de aanname over de ratio van F en V ook iets wordt vast-

gelegd over de relatie tussen F en V zelf. We komen hierop later nog terug. Uit differentiaalvergelijking (1) volgt dat:

$$\text{Ln } (R_t) = \alpha t + \beta \quad (3)$$

En dus eveneens dat:

$$R_t = e^{\alpha t + \beta} \quad (\text{Model 1})$$

Vanwege aanname (1) wordt dit model het lineaire operatormodel genoemd en vanwege de uiteindelijke vorm de negatief exponentiële leercurve. De afleiding is gegeven om te laten zien dat aan de ogenschijnlijk willekeurig gekozen exponentiële leerfunctie een realistische aanname ten grondslag ligt. Het geeft aan dat het leren tijdafhankelijk is en de mate waarin geleerd wordt een constante proportie is van hetgeen nog te leren valt en dus afneemt in de tijd. De α -parameter geeft de leersnelheid aan en wordt geacht negatief te zijn, omdat alleen in dat geval de onveiligheid afneemt. De β -parameter geeft verschuivingen in de tijd weer. Deze is op zich van minder belang voor de interpretatie van het proces.

De aanname van een lineaire operatormodel voor V_t , met een positieve parameter, zou uitmonden in een exponentiële groei van het verkeer in de tijd. Wanneer onbeperkte groei mogelijk zou zijn lijkt deze aanname redelijk, maar niet in het verkeer. Op een gegeven moment zal er sprake zijn van verzadiging in de vraag en wellicht al eerder in het aanbod (of de prijs waartegen een verder aanbod nog mogelijk is). Naarmate de produktie stijgt, zal er dan een soort tegendruk ontstaan die toeneemt met het stijgen. Met andere woorden, de verhouding tussen de gerealiseerde groei op moment t en de dan nog resterende potentiële groei is bepalend voor de groeisnelheid. Een eenvoudige aanname die in de econometrie vaak wordt gemaakt is de veronderstelling dat de toename van de ratio tussen gerealiseerde en potentiële groei (dS_t/dt) gelijk is aan een constante maal de toestand (S_t) op het moment van groei, ofwel:

$$S_t' = \alpha \cdot S_t \quad (4)$$

Uit de oplossing van deze differentiaalvergelijking volgt:

$$\text{Ln } (S_t) = \text{Ln} \left(\frac{V_t}{V_m - V_t} \right) = at + b \quad (5)$$

wat geschreven kan worden als:

$$V_t = \frac{V_m}{1 + e^{-(at+b)}} \quad (\text{Model 2})$$

Dit is het logistische model voor het aantal voertuigkilometers.

Als we formule (4) expliciet uitschrijven als:

$$d \left(\frac{V_t}{V_m - V_t} \right) / dt = a \cdot \left(\frac{V_t}{V_m - V_t} \right) \quad (6)$$

en weer de quotiëntregel van het differentiëren gebruiken, dan volgt hieruit eenvoudig dat:

$$V_t' = d(V_t)/dt = a/V_m \cdot V_t \cdot (V_m - V_t) \quad (7)$$

Uit (2) en (7) volgt dan verder dat:

$$d [\ln(F_t)]/dt = (\alpha + a) - a/V_m \cdot V_t \quad (8)$$

ofwel, dat de afgeleide van de logaritme van het aantal doden een lineaire functie is van het aantal voertuigkilometers.

Uit (1) en (4) volgt voor $T = RS$ dat:

$$T_t' = d(T_t)/dt = (a + \alpha)T_t \quad (9)$$

en dat dus ook $F_t/(V_m - V_t)$ exponentieel is, met parameter $a + \alpha$.

Voor $RT = R^2S = F_t^2/[V_t(V_m - V_t)]$ geldt eveneens dat de functie exponentieel is met parameter $a + 2\alpha$. Indien $a = -2\alpha$, dan volgt:

$$F_t^2 = c \cdot V_t \cdot (V_m - V_t) \quad (10)$$

De combinatie van formule (7) en (10) laat zien dat in dit speciale geval F_t een functie is van de afgeleide van V_t . Er geldt dan eveneens dat de parameter voor T in formule (9) gelijk is aan $-\alpha$.

Samenvattend geldt dus dat de ontwikkelingen van het verkeer en de verkeersveiligheid in deze modellen slechts aan de tijd gerelateerd worden. De aannamen voor de groei van het verkeer en voor de afname van de ver-

keersonveiligheid, uitgedrukt in de logaritme van de ratio's S_t en R_t , betreffen slechts eenvoudige lineaire herschalingen $at + b$ en $\alpha t + \beta$ van de tijd. Dit betekent onder meer dat de ontwikkelingen in de diverse landen geacht worden gelijk aan elkaar te zijn, op een verschuiving in de tijd na en een constant verschil in snelheid waarmee de veranderingen plaatsvinden. De enige nog resterende onbekende is het verzadigingsniveau voor het aantal voertuigkilometers V_m , dat per land zal verschillen en uit de beschikbare gegevens moet worden geschat. Toepassing van deze eenvoudige, maar zeer stringente aannamen over de groei van het verkeer en de verkeersveiligheid op de beschikbare gegevens uit zes ontwikkelde landen is verrassend adequaat gebleken. Verder blijkt ook de sterke aanname over de samenhang tussen de snelheid van het verkeersproces en de snelheid waarmee de verkeersveiligheid verloopt, zoals vastgelegd in formule (10), realistisch te zijn.

4. DE RESULTATEN

De modellen zijn toegepast op de gegevens van zes landen. Voor deze zes landen waren zowel het aantal doden als het aantal verreden voertuigkilometers beschikbaar over de laatste veertig jaar. De auteur beschikte niet over gegevens van andere landen over zo'n lange periode. De verkeersprestatie is gemeten in 10^9 kilometers. Voor de Verenigde Staten zijn de gegevens sinds 1947 gebruikt om het effect van de tweede wereldoorlog uit te schakelen. Voor de andere landen vanaf het jaar dat deze beschikbaar waren. Oppe (1989) gebruikt oorspronkelijk voor Nederland door de SWOV geraamde conservatieve aantallen die tot 1950 terug gaan. Later zijn deze aangepast aan nieuwe, op het CBS-Onderzoek Verplaatsingsgedrag (OVG) gebaseerde gegevens, die de ontwikkeling vanaf 1978 weergeven. Deze ramingen liggen beduidend hoger.

Tabel 1 toont de resultaten van de toegepaste analyses. De α -parameters van model 1 variëren van -0,02 voor de Verenigde Staten tot -0,12 voor Japan. Dit betekent dat over deze periode de afname van de onveiligheid in Japan het grootst is geweest en het kleinst voor de Verenigde Staten. Na Japan volgen respectievelijk Nederland, Bondsrepubliek Duitsland, Israël en Groot-Brittannië. De parameters voor de groei van het verkeer lopen van 0,23 tot 0,06. De volgorde is bijna dezelfde, het grootst voor Japan, gevolgd door Nederland, Israël, Bondsrepubliek Duitsland, Groot-Brittannië en de Verenigde Staten.

Afbeelding 2 geeft de resultaten weer voor Nederland. In Oppe (1989 en 1991a) is een volledig beeld gegeven van de resultaten voor alle zes landen. De geschatte hoogte van V_m , de waarde waarvoor de functie het best bij de geobserveerde waarden van V_t past, bedraagt voor de nieuwe CBS-gegevens $V_m = 94 \cdot 10^9$ km's.

De verwachte groei van het verkeer bedraagt voor ons land dus nog slechts enkele procenten, gerekend vanaf 1988. Voor de Verenigde Staten is deze geschatte groei nog zo'n 40 procent. Deze schattingen hebben geleid tot nogal wat kritiek. Inderdaad blijken de schattingen voor V_m , in tegenstelling tot die voor de andere parameters, niet erg stabiel. Een verdere groei met 70%, zoals oorspronkelijk geraamd in het SVV bij ongewijzigd beleid, lijkt echter onwaarschijnlijk, gegeven het verloop van de ontwikkeling over de laatste veertig jaar. De tendens om grenzen te stellen aan de groei van het verkeer kan ertoe leiden dat de toekomstige vraag zal afnemen en het verzadigingsniveau inderdaad eerder wordt bereikt dan valt af te leiden uit de eerder verwachte groei.

We kunnen de modelbeschrijvingen uitdrukken in de geschatte waarden voor $\ln(S_t)$. Dit resulteert volgens formule (5) in een rechte lijn. Afbeelding 3 geeft de berekende rechten voor alle zes landen. De zes rechten blijken bij benadering een punt gemeen te hebben, ongeveer daar waar de waarden voor $\ln(S)$ gelijk zijn aan nul. Een kleinste-kwadratenoplossing voor dit punt resulteert in waarden $t = 1969,6$ en $\ln(S) = 0,16$. Als $\ln(S)$ op nul wordt gesteld vinden we $t = 1970,7$. Een interpretatie voor dit verschijnsel is dat de ontwikkelingen in de verschillende landen, hoewel verschillend in tempo en absoluut niveau, aan elkaar gerelateerd zijn via de wereldeconomie. Alle landen hebben de sterkste groei in verkeer rond 1970. $\ln(S)$ is dan gelijk aan nul en V dus gelijk aan half V_m .

De figuur suggereert dat de energiecrisis, die kort na 1970 plaatsvond, veroorzaakt is door de cumulerende vraag naar olie in de industriële landen. De actie van de olieproducerende landen moet dan eerder gezien worden als een gevolg van deze (een crisis veroorzakende) explosieve groei, dan als de directe oorzaak van deze energiecrisis.

Het is niet direct duidelijk waardoor het verschil in groeisnelheid voor de verschillende landen wordt bepaald. Waarschijnlijk door een combinatie van economische groei en factoren als bevolkingsdichtheid, geografische omstandigheden en sociaal-economische infrastructuur.

In Afbeelding 4 staan de rechte lijnen weergegeven voor $\ln(R) = \ln(F/V) = \alpha t + \beta$ zoals gegeven in formule (3). Ook hier zien we dat de rechten bij benadering een punt gemeen hebben. De kleinste-kwadratenoplossing geeft $t = 1980,6$ en $\ln(R) = 3,35$. Dit punt ligt dus ongeveer tien jaar later in de tijd. Een mogelijke verklaring voor deze verschuiving in de tijd is dat het signaleren van systeemfouten en het bedenken en toepassen van maatregelen ter verbetering van een bestaande situatie tijd kost. Dit na-ijl-effect zou dan tien jaar bedragen. We zullen later zien dat er inderdaad sprake is van een faseverschuiving tussen de groei van het verkeer en de afname van de onveiligheid. De gemeenschappelijke waarde van 3,35 voor $\ln(R)$ is gedeeltelijk arbitrair, omdat deze afhankelijk is van de keuze van de noemer. Misschien zou een norm voor vergelijking met andere maatschappelijke activiteiten gevonden kunnen worden door voor de noemer een tijdmaat te kiezen (bijvoorbeeld de gemiddelde duur van een kilometer verplaatsen).

Afbeelding 5 laat de relatie zien tussen de waarden voor de a -parameter die de groeisnelheid van het verkeer aangeeft en de α -parameter voor de groeisnelheid van de verkeersveiligheid. Hieruit blijkt inderdaad bij

benadering dat $a = -2\alpha$, zodat het speciale geval, waarvan in formule (10) sprake was lijkt op te gaan en het aantal doden dus een functie is van het aantal voertuigkilometers. Koornstra (persoonlijke communicatie) wees op de relatie tussen de formules (7) en (10) en constateerde dat het aantal doden dus een functie was van de afgeleide van de hoeveelheid verreden voertuigkilometers. Omgekeerd liet hij zien dat de veronderstelling dat het aantal doden een afgeleide is van het aantal voertuigkilometers, gekoppeld aan speciale assumpties over de specifieke functies, waarmee elk van de processen kunnen worden beschreven, leidt tot specifieke paren van mogelijke combinaties voor deze functies (Oppe et al., 1988; Oppe & Koornstra, 1990). We komen hierop later nog terug.

Op dit moment constateren we slechts dat de volgende relatie lijkt te bestaan tussen het aantal doden en het verreden aantal voertuigkilometers:

$$F_t = c \cdot (dV_t/dt)^{1/2} \quad (11)$$

Deze eenvoudige en interpreteerbare modellen - eenvoudig in de zin van parameterarm en interpreteerbaar omdat ze op aannamen over het proces van verandering gebaseerd zijn - geven een goede beschrijving van de globale ontwikkeling in het verkeer en de verkeersveiligheid. Verder brengen ze nieuwe feiten aan het licht, zowel omtrent de ontwikkelingen zelf als over hun relatie. Gekozen is voor de meest eenvoudige veronderstellingen over het verloop van beide processen. Alternatieve beschrijvingen zijn zoals gezegd mogelijk.

Uit Afbeelding 2 blijkt echter dat de modelafwijkingen van alternatieve, parameterarme beschrijvingen niet veel kleiner zullen zijn, terwijl tegelijk duidelijk is dat er naast de toevallige, ook systematische afwijkingen zijn die door het model niet worden verklaard. Dit geldt zowel voor de ontwikkeling van het verkeer als voor de verkeersveiligheid. Het feit dat deze schommelingen rond de globale trend het grootst zijn voor het aantal ongevallen, lijkt te bevestigen dat het hier gaat om een gecombineerd effect van afwijkingen van twee meer fundamentele processen.

We zullen hieraanvolgend nader ingaan op deze modelafwijkingen.

5. MODELASSUMPTIES EN SYSTEMATISCHE AFWIJKINGEN VAN HET MODEL

Om de invloed van de modelassumpties op de beschrijving van de gegevens nader te onderzoeken, zullen we beide assumpties vervangen door minder specifieke aannamen. Voor we dit doen gaan we echter eerst in op de beschrijving van de modelafwijkingen zelf. Om een vergelijking te kunnen maken tussen de systematische afwijkingen van de ontwikkelingen in het verkeer en de verkeersveiligheid, moeten we ons realiseren dat de afwijkingen tussen het aantal voertuigkilometers en het dodenquotiënt niet onafhankelijk van elkaar zijn. Een te hoge toevallige waarde voor V resulteert in een te lage waarde voor F/V . De aantallen voor V en F zijn in principe wel onafhankelijk. Deze modelafwijkingen kunnen dus wel worden vergeleken. Om dit goed te kunnen doen, zullen we deze afwijkingen in standaardvorm weergeven. In Afbeelding 6 zijn deze waarden voor Nederland afgebeeld; Oppe (1991b) geeft deze waarden voor alle zes landen.

Uit Afbeelding 6 blijkt dat de modelafwijkingen sterk correleren. Als V_t relatief hoog is, dan is ook F_t relatief hoog, terwijl F_t laag is bij een lage V_t . Ook in de andere landen is sprake van een samenhang, maar deze is vaak minder duidelijk. Zoals vermeld werd dit effect ook al door Adams gevonden bij de beschrijving van het verloop in Engeland. Het aantal voertuigkilometers lijkt dus naast een lange-termijnontwikkeling onderhevig aan korte-termijnschommelingen, waarschijnlijk van conjuncturele aard. Geldt voor de globale trend dat het aantal ongevallen, verschoven in de tijd, samenhangt met de afgeleide van het aantal voertuigkilometers, voor de modelafwijkingen geldt dat er een directe samenhang is tussen doden en voertuigkilometers, niet verschoven in de tijd. Indien het aantal voertuigkilometers als het ware onverwacht hoog of laag uitvalt, dan vertaalt dat zich direct in een eveneens hoog of laag aantal doden. Onverwacht sterke stijgingen van het aantal voertuigkilometers zijn dus extra ongunstig voor de veiligheid. Dit extra effect voegt aan de 82,2% van de variantie die door de lange-termijntrend wordt verklaard nog ruim 9% toe, zodat totaal 91,5% van de variantie in het aantal doden verklaart kan worden uit het aantal voertuigkilometers. In Afbeelding 7 zijn de waargenomen en de uit de combinatie van beide effecten voorspelde aantallen doden weergegeven.

Uit toepassing van model 1 en model 2 op de geobserveerde gegevens volgt dat het aantal doden kon worden geschreven als functie van de afgeleide van de voertuigkilometers. Een alternatief model wordt verkregen wanneer

de assumptie van model 1 voor het dodenquotiënt wordt vervangen door de assumptie dat het aantal doden een functie is van de afgeleide van het aantal voertuigkilometers. Aan model 2 wordt dan de volgende assumptie toegevoegd:

$$F_t = c \cdot [dV_t/dt]^q \quad (12)$$

met c en q te fitten parameters. In Tabel 2 zijn de resultaten weergegeven voor de zes landen. In het algemeen zijn de parameters q groter dan de 0,5 die mocht worden verwacht uit formule (10), maar kleiner dan 1. Het percentage verklaarde variantie is voor Nederland groter dan uit de combinatie van model 1 en 2, hoewel het aantal parameters gelijk is. Door combinatie van dit nieuwe model met de aanvullende verklaring uit de nieuw berekende modelafwijkingen, komt de totale hoeveelheid verklaarde variantie van het aantal doden uit de hoeveelheid verkeer op 95,8%.

Uit model 1 volgt een specifieke relatie tussen de afgeleiden van het aantal voertuigkilometers en het aantal doden zoals weergegeven in formule (2). Naast het aantal doden zou dus ook de afgeleide uit het aantal doden gerelateerd zijn aan de afgeleide van het aantal voertuigkilometers. Uit de gevonden resultaten bleek dit ook het geval te zijn. Om deze relatie nader te onderzoeken zouden we daarom willen afzien van de specifieke gedaante van de twee modellen voor $\ln(S)$ en $\ln(R)$ en los daarvan willen kijken naar de functies en hun afgeleiden. Hiertoe kunnen we het verloop voor F en V elk benaderen met een polynoom. Een polynoom van een lage graad zal dan vooral de globale trend in de geobserveerde gegevens beschrijven, een polynoom met een hoge graad eveneens de systematische schommelingen. Indien de graad te hoog wordt, dan worden ook toevallige fluctuaties weergegeven. De polynoom moet niet worden gezien als een model in de ware zin van het woord, maar als een manier om het gladde verloop van de ontwikkelingen te beschrijven, los van toevallige fluctuaties. Het voordeel van een benadering met een polynoom is, dat wanneer de parameters bekend zijn, tevens ook de hier benodigde afgeleiden van de benaderingscurven zijn gegeven.

Afbeelding 8 geeft de resultaten weer voor een polynoom van de elfde graad. Deze figuur laat inderdaad zoals verwacht een verschuiving in de tijd zien tussen het aantal doden en de afgeleide van het aantal voertuigkilometers. Voor de afgeleide van het aantal doden is zo'n verschuiving niet aanwezig. Formule (2) beschrijft de relatie tussen $\{dF_t/dt\}/F$ en

$(dV_t/dt)/V$ onder de aanname van het lineaire operatormodel. In Afbeelding 9 zijn de resultaten weergegeven voor een polynoom van de vijftiende graad. We zien dat zelfs kleine fluctuaties in beide functies parallel verlopen. Beide grafieken laten duidelijk zien dat de specifieke relaties tussen het verloop van de ontwikkelingen voor F en V zoals weergegeven in en afgeleid uit model 1 en 2, hun betekenis behouden, ook los van deze specifieke aannamen. Oppe (1991b) laat zien dat zulke relaties ook voor de andere landen bestaan, zij het minder duidelijk. Het lijkt erop dat er in de andere landen faseverschillen bestaan tussen de ontwikkeling van het verkeer en de verkeersveiligheid, terwijl deze fasen in Nederland gelijk lopen.

6. THEORETISCHE VERDIEPING

Op basis van het in formule (10) en (11) geconstateerde verband tussen de groeifunctie en de leerfunctie, waarbij het leren kan worden geschreven als een functie van de afgeleide van de groei, combineerde Koornstra beide functies tot een samengestelde functie en koos deze relatie als uitgangspunt voor zijn beschrijving (Oppe & Koornstra, 1990 en Koornstra (1991). Verder ging hij na welke veralgemeniseringen mogelijk waren. Hij plaatste het probleem daarbij in de ruimere context van adaptieve systemen, waaronder behalve produktiesystemen ook biologische, ecologische of evolutionaire systemen kunnen vallen. Hij spreekt dan ook liever in het algemeen van adaptatie dan van leren. Een systeem past zich aan aan zijn omgeving, gewijzigde omstandigheden enz. De maat voor adaptatie wordt ook veralgemeend tot de hoeveelheid "zelfdestructieve elementen per mogelijkheid van destructie".

Toegepast op het verkeer wordt deze maat dan ook niet uitgedrukt in doden of gewonden per produktie-eenheid (voertuigkilometer), maar per expositie-eenheid. Verondersteld wordt dat het aantal gebeurtenissen waarin er iets mis kan gaan een machtsfunctie is van de totale hoeveelheid verkeer, waarbij de macht ergens tussen 1 en 2 zal liggen.

Hij ging vervolgens na welke functies op basis van de samenhang tussen de twee ontwikkelingen toegestaan waren. De gekozen modellen 1 en 2 lijken tamelijk willekeurig. In de econometrie worden ook andere modellen gebruikt voor de beschrijving van ontwikkelingen in produktieprocessen. Zo wordt soms een gegeneraliseerde versie van de logistische functie gebruikt, waarin deze niet rechtstreeks wordt toegepast op V , maar op een willekeurige macht van V . Er wordt dan een extra parameter toegevoegd voor deze macht. De functie heeft het voordeel dat deze niet meer symmetrisch hoeft te zijn en dus flexibeler is. Verder worden de Gompertz-curve en de log-reciproke curve gebruikt.

Ook worden er in de mathematische leerpsychologie naast het lineaire operator model andere leermodellen gebruikt, zoals het urn-model en het beta-model van Luce. Koornstra toont aan dat er specifieke combinaties bestaan tussen de drie genoemde produktiemodellen en de drie genoemde leermodellen, waarbij elke keer sprake is van een eenvoudige relatie tussen de afgeleide van het produktiemodel en het leermodel. De hierboven gebruikte formule (10) kan daaraan worden toegevoegd. Vervolgens laat hij zien dat de drie produktiemodellen bijzondere gevallen zijn van een algemeen

model. Door toepassing van dit algemene model op de gegevens kan dan blijken welke specifieke gedaante het best bij de gegevens past en welke specifieke aannamen over de relatie tussen het aantal doden en de afgeleide van de produktiecurve dan kunnen worden toegevoegd.

Tenslotte ging hij na of eenzelfde beschrijving kan worden gegeven voor het aantal gewonden.

Kort samengevat komt Koornstra's uitwerking op het volgende neer:

De snelheid van verandering van V op tijdstip t wordt uitgedrukt door $Q_t = (dV_t/dt)/V_t$ en de adaptatie door $P_t = F_t/(k \cdot V_t^S)$. Bij het aan elkaar relateren van de ontwikkeling van het verkeer en die van de veiligheid dient rekening te worden gehouden met een verschuiving in de tijd ($t - \tau$) tussen de ontwikkelingen en een eventueel verschil in ontwikkelingssnelheid (q). De basisaannamen zijn nu:

$$P_t = \delta \cdot Q_{t-\tau}^\mu \quad (13)$$

waarin δ een parameter is die voor doden en gewonden kan variëren en μ een combinatie is van een specifiek effect en een verschil in ontwikkelingsnelheid, uitgedrukt door q .

Tenslotte wordt rekening gehouden met de mogelijkheid dat het niveau π waarnaar P_t uiteindelijk afneemt niet nul hoeft te zijn, maar dat $\pi > 0$ een reële mogelijkheid is. Koornstra noemt dit model het evolutionaire adaptatiemodel.

Bijzondere gevallen ontstaan door combinatie van:

- de gegeneraliseerde logistische functie met het beta-leermodel van Luce (hetgeen een logistisch leermodel is); hierbij is $\mu = q$;
- de Gompertz-curve met het lineaire operatormodel; eveneens met $\mu = q$;
- (gegeneraliseerde) log-reciproke groei met het urn-model voor het leren; hierbij is $\mu = q \cdot (k + 1)$, met k een parameter uit de functie voor de log-reciproke groei.
- de gegeneraliseerde logistische curve met het lineaire operatormodel, zoals in het oorspronkelijke model is gebruikt; hierbij is $\mu = 1/2$.

Bij toepassing op de gegevens van een aantal landen blijkt de gegeneraliseerde logistische functie de gegevens het best te beschrijven. Dit model heeft ook het theoretische voordeel dat bij toename in de tijd een stabiel maximum ontstaat voor de hoeveelheid verkeer. Dit is niet het geval bij de andere functies. Daarbij zou na het bereiken van een maximum weer een

afname volgen. In principe is dit natuurlijk wel mogelijk, bijvoorbeeld bij overname van het bestaande systeem door een ander, maar niet waarschijnlijk. Koornstra kiest derhalve voor de eerstgenoemde variant en noemt deze het evolutionaire groeimodel.

Eenzelfde beschrijving als gegeven voor de doden, kan ook gegeven worden voor het aantal gewonden. In deze beschrijving kunnen de expositieparameter s , de parameter q voor de processnelheid, de waarde van π , het uiteindelijke niveau en δ_g , de constante in formule (13) voor het aantal gewonden, verschillen van de waarden die de functie heeft bij het aantal doden. Wanneer dezelfde waarden voor s en q worden aangenomen dan is het aantal gewonden te schrijven als:

$$G_t = a \cdot F_t + b \cdot V_t^s \quad (14)$$

waarin $a = \delta_g \cdot (1 - \pi) / \delta_f$ en $b = \delta_g \cdot \pi$.

Uitgaande van formule (13) kan P_t ook geschreven worden als:

$$P_t = \delta_f [\alpha (1 - (\hat{V}_{t-\tau} / V_m)^c)]^\mu \quad (15)$$

met α een parameter voor de adaptatiesnelheid en c voor de asymmetrie van de gegeneraliseerde logistische functie, die gelijk is aan 1 in het geval van de (symmetrische) logistische functie uit het oorspronkelijke model. Door voor de uit het model voor V_t berekende verwachte waarden \hat{V}_t de geobserveerde waarden V_t te kiezen en formule (15) vervolgens toe te passen op het aantal doden in Nederland kan - gegeven de aannamen waaronder die van de gegeneraliseerde logistische functie en de aan de groei gerelateerde adaptatie uitgedrukt in formule (13) de belangrijkste zijn - een voorspelling worden gegeven van het aantal doden uit het aantal voertuigkilometers. Afbeelding 10 geeft het resultaat van de toepassing van formule (15) weer. Eenzelfde toepassing op het aantal gewonden laat zien dat de extra aanname van gelijke waarden voor s en q die leidt tot formule (14) inderdaad realistisch is, maar dat voor π een waarde wordt gevonden die groter is dan nul. Afbeelding 11 laat het resultaat zien van de toepassing van formule (14) op het aantal gewonden in Nederland.

Niet alleen het aantal doden F_t is dus gerelateerd aan het aantal voertuigkilometers V_t , maar ook de dynamische vergelijkingen voor het aantal gewonden G_t kunnen beschreven worden in relatie tot deze grootheden.

7. SAMENVATTING EN CONCLUSIES

Het rapport geeft een samenvatting van een aantal eerdere publikaties waarin modellen staan beschreven voor de ontwikkelingen van de hoeveelheid verkeer (uitgedrukt in het aantal door het gemotoriseerde verkeer afgelegde voertuigkilometers), het aantal doden en het aantal gewonden in Nederland op het hoogste aggregatieniveau.

Deze modellen zijn gebaseerd op de aanname dat de ontwikkelingen onderdeel uitmaken van een zich ontwikkelend systeem. In engere zin wordt het verkeerssysteem opgevat als een produktiesysteem, en zijn modellen toegepast die in de econometrie worden gebruikt. Aangetoond is dat een van de belangrijkste kwaliteitsaspecten van het verkeerssysteem, de veiligheid ervan, gerelateerd is aan de groei van het verkeer. Het verkeerssysteem kan daarom worden gezien als een adaptief systeem. De systeembeschrijving kan dan ook ruimer worden geïnterpreteerd, waarbij het verkeerssysteem eerder is te vergelijken met adaptieve biologische groeisystemen. Een dergelijke beschrijving van het verkeer als systeem heeft nog niet eerder plaatsgevonden. Wel wordt er al heel lang in meer algemene zin over het verkeerssysteem gesproken.

Specifieke relaties tussen veel gebruikte groeicurven en leermodellen zijn afgeleid, waarbij op een "natuurlijke" manier paren van groei- en leerfuncties ontstaan, die van toepassing lijken op meerdere groeisystemen. De gebruikte modellen zijn in staat om, ondanks het grote verschil in ontwikkelingssnelheid tussen landen, toch de ontwikkelingen van het verkeer en de verkeersveiligheid voor diverse ontwikkelde landen goed te beschrijven met een gering aantal parameters.

Uit de analyses die zijn toegepast op zes geïndustrialiseerde landen blijkt dat het groeitempo verschilt, maar dat de groeicurven alle een punt in de tijd gemeen hebben. Bij dit tijdstip, rond 1970, is de groei voor alle landen het sterkst. Een verklaring daarvoor kan gevonden worden in de ontwikkeling van de wereldeconomie. De constatering suggereert dat de energiecrisis in het begin van de jaren zeventig veroorzaakt is door de samenvallende culminerende groei van de vraag naar olie en dat de actie van de olieproducerende landen daar eerder een afgeleide van is dan de directe oorzaak.

Ook voor de ontwikkeling van de veiligheid is voor deze landen een gemeenschappelijk tijdstip geconstateerd. Dit tijdstip ligt ongeveer tien jaar later. De verschuiving in de tijd is niet verwonderlijk als men bedenkt

dat er een behoorlijke tijd verloopt tussen het constateren van de omvang van de veiligheid en het voorbereiden en uitvoeren van maatregelen. Uit specifieke analyses is gebleken dat een dergelijke verschuiving ook daadwerkelijk aanwezig is.

Het geconstateerde verschil in groeitempo van het verkeer in zes landen blijkt samen te gaan met een evenredige groei in de veiligheid. De gevonden waarden voor de groei- en veiligheidsparameters geven aan dat het aantal doden is te schrijven als een functie van de afgeleide van het verkeer in wiskundige zin. Een dergelijke beschrijving van deze relatie is ons uit de literatuur niet bekend. Het zou goed zijn om na te gaan of er ook bij andere adaptieve systemen van zo'n relatie sprake is.

De hierboven besproken resultaten hebben betrekking op het aantal doden in het verkeer. De beschrijvingen geven aan dat, als de ontwikkeling zich voortzet, het dodenquotiënt tot nul zal dalen en er uiteindelijk dus geen doden meer zullen vallen in het verkeer. De modellen zijn ook toepasbaar op de ontwikkeling van het aantal gewonden. Deze volgt de ontwikkeling van het aantal doden, zij het dat hierbij geen daling is te verwachten tot nul gewonden, maar dat het verkeer een aanzienlijk aantal gewonden zal blijven tellen.

Aangetoond is verder dat behalve relaties tussen de beschrijving van de lange-termijnontwikkelingen van verkeer en verkeersveiligheid ook relaties bestaan tussen korte-termijnschommelingen in de hoeveelheid verkeer en de aantallen doden en gewonden. Een toename of afname van de hoeveelheid verkeer ten opzichte van de lange-termijnverwachting uit zich direct in een evenredige toename of afname in de aantallen doden.

Combinatie van de lange- en korte-termijneffecten laat zien dat de aantallen doden en gewonden zeer sterk samenhangen met de hoeveelheid verkeer: tot 95% van de variantie in de aantallen doden en gewonden is "te verklaren" uit de hoeveelheid verkeer. Het zal daarom moeilijk zijn om specifieke effecten van maatregelen op het hoogste aggregatieniveau aan te tonen. Voor het aantonen van effecten van dergelijke maatregelen zal gekeken moeten worden naar specifieke doelgroepen of tijdstippen, waarbij gezocht wordt naar een trendbreuk in de trendmatige ontwikkeling na correctie voor de momentane ontwikkelingen in het verkeer.

Naast de oorspronkelijke modellen, die uitgaan van de meest eenvoudige aannamen voor de groei van het verkeer en de veiligheid ervan, resulterend in een logistische groeicurve en een negatief-exponentiële leercurve, zijn ook andere modellen mogelijk. Op basis van elementaire assumpties over

adaptieve groeisystemen kan een zeer algemene groeifunctie worden gedefinieerd, waarvan de belangrijkste in de literatuur te vinden modellen als bijzonder geval afgeleid kunnen worden. Bij toepassing van deze algemene groeifunctie is gebleken dat het gegeneraliseerde logistische model de voorkeur verdient boven andere modellen. Op basis hiervan is een evolutionair groeimodel ontwikkeld. Hieraan is een evolutionair adaptatiemodel gekoppeld, waarin de relatie tussen de evolutionaire groei en de adaptatie van het systeem is vastgelegd.

De beschrijvingen laten zien dat ontwikkelingen van een sociaal-adaptief systeem zoals het verkeerssysteem grote wetmatigheden vertonen. Het mag als verrassend worden beschouwd dat dergelijke sociale processen wiskundig te beschrijven zijn. Met enige ironie zou men kunnen constateren dat juist op een moment dat het communisme als sociaal systeem wordt losgelaten, evidentie wordt gevonden voor één van de peilers van het eraan ten grondslag liggende historisch materialisme, namelijk dat sociale processen een wetmatig verloop hebben.

LITERATUUR

- Adams, J.G.U. (1985). Risk and freedom, the record of road safety regulations. Bottesford Press, Nottingham, 1985.
- Adams, J.G.U. (1987). Smeed's law: Some further thoughts. Traffic Engineering & Control 28 (2): 70-73.
- Andreassen, D.C. (1987). More D. P. and V. (Letter to the Editor). Traffic Engineering & Control 28 (7/8) : 411-413.
- Appel, H. (1982). Strategische Aspekte zur Erhöhung der Sicherheit im Strassenverkehr: Automobil-Industrie (1982) 3: 347-356.
- Blokpoel, A. (1982). Relatie verkeersintensiteit en aantal verkeersdoden Interne SWOV-notitie 96311.
- Broughton, J. (1988). Predictive models of road accident fatalities. Traffic Engineering & Control 29: 296-300.
- Haight, F.A. (1984). Why the per capita traffic fatality rate is falling. Journal of Safety Research 15: 137-140.
- Hakim, S.; Shefer, D.; Hakkert, A.S. & Hocherman, I. (1988). A critical review of macro models for road accidents. Publ. nr. 88-075. Technion - Israel Institute of Technology, 1988.
- Koornstra, M.J. (1988). Development of road safety in some european countries and the USA. R-88-33. SWOV, Leidschendam, 1988.
- Koornstra, M.J. (1991). The evolution of traffic and traffic safety. (Forthcoming).
- Mertens, P. (1973). Mittel- und langfristige Absatzprognose auf der Basis von Sättigungsmodellen. In: Mertens, P. (ed.). Prognoserechnung. Physica-Verlag, Würzburg, 1973.
- Minter, A.L. (1987). Road casualties; Improvement by learning processes. Traffic Engineering & Control 28 (2): 74-79.
- Norman, L.G. (1962). Road traffic accidents. Public Health Paper No 12. WHO, Geneva, 1962.
- Oppe, S. (1989). Macroscopic models for traffic and traffic safety. Accid. Anal. & Prev. 21 (3): 225-232.
- Oppe, S. (1991a). The development of traffic and traffic safety in six developed countries. Accid. Anal. & Prev. 23 (5): 401-412.
- Oppe, S. (1991b). Development of traffic and traffic safety: Global trends and incidental fluctuations. Accid. Anal. & Prev. 23 (5): 413-422.
- Oppe, S. & Koornstra, M.J. (1990). A mathematical theory for related long term developments of road traffic and safety. In: M.Koshi (ed.). Transportation and Traffic Theory. Elsevier, New York, 1990.

- Oppe, S.; Koornstra, M.J. & Roszbach, R. (1988). Macroscopic models for traffic and traffic safety. In: Traffic Safety Theory and Research Methods, Session 5: Time dependent models. SWOV, Leidschendam, 1988.
- Peranio, A. (1970). Conceptualization and use of road safety and traffic engineering formulas. Traffic Quarterly 25 (3): 429-446.
- Smeed, R.J. (1949). Some statistical aspects of road safety research. J. Royal Stat. Soc., A(I): 1-34.
- Smeed, R.J. (1962). Growth of road traffic and motor fuel consumption. I.P. Review, 1962.
- Smeed, R.J. (1972). The usefulness of formulae in traffic engineering and road safety. Accid. Anal. & Prev. 4: 303-312.
- Smeed, R.J. (1974). The frequency of road accidents. Z. f. Verkehrss. 20: 95-108 and 151-159.
- Sternberg, S. (1967). Stochastic learning theory. In: Luce, R.D.; Bush, R.R. & Galanter, E. (eds.). Handbook of mathematical psychology, Vol. II, Ch. 9. Wiley, New York, 1967.
- Tanner, J.C. (1958). An analysis of increases in motor vehicles in Great Britain and the United States. Internal research note RN 3340, Road Research Laboratory, 1958.
- Wilde, G.J.S. (1982). The theory of risk homeostasis: Implications for safety and health. Risk Analysis 2 (4): 209-225.
- Zlatoper, T.J. (1989). Models explaining motor vehicle death in the United States. Accid. Anal. & Prev. 21 (2): 125-154.



AFBEELDINGEN 1 T/M 11

Afbeelding 1. Ontwikkeling van het verkeer, de doden en het dodenquotiënt voor Nederland (Blokpoel, 1982).

Afbeelding 2. Geschatte en geobserveerde aantallen voertuigkilometers, dodenquotiënten en aantallen doden voor Nederland.

Afbeelding 3. Verwachte waarden voor $\ln(V/(V_m-V))$ voor zes landen.

Afbeelding 4. Verwachte waarden voor $\ln(F/V)$ voor zes landen.

Afbeelding 5. Relatie tussen de parameters a en α voor respectievelijk de verkeersprestaties en dodenquotiënten.

Afbeelding 6. Gestandaardiseerde modelafwijkingen van V en F voor Nederland.

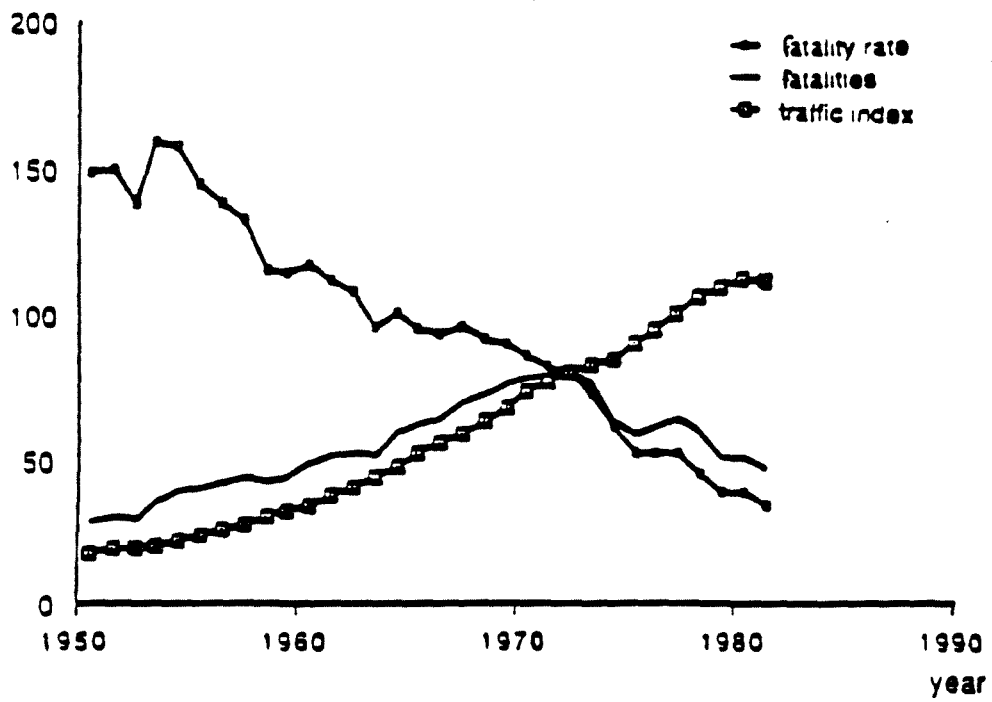
Afbeelding 7. Geobserveerde en geschatte aantallen doden in Nederland voor de combinatie van lange-termijnontwikkelingen en korte-termijnafwijkingen daarvan.

Afbeelding 8. Geschatte waarden voor dV/dt , dF/dt en geobserveerde waarden voor F voor Nederland, behorend bij een elfde graads polynoom.

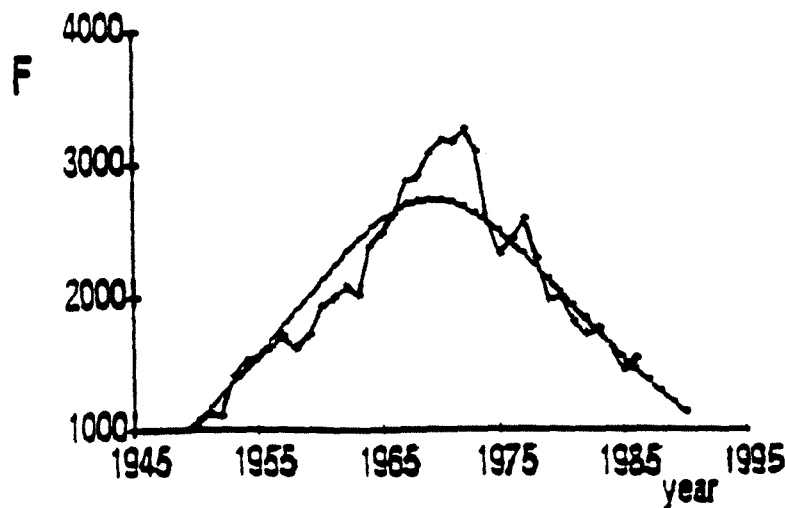
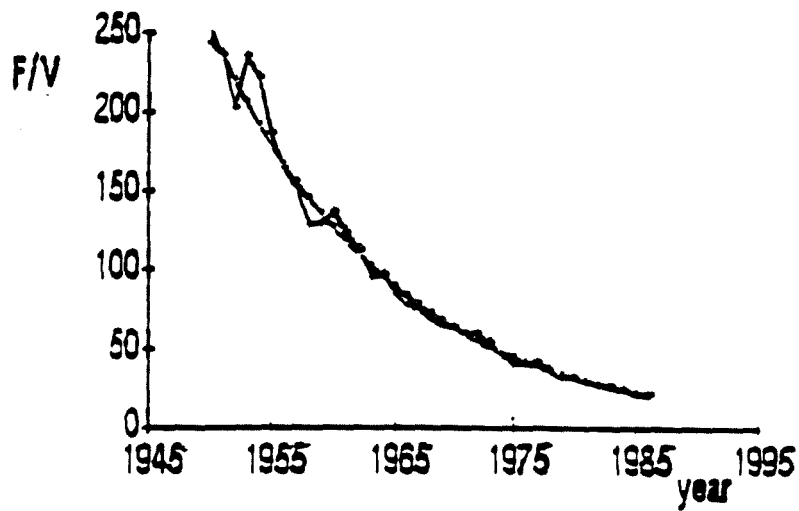
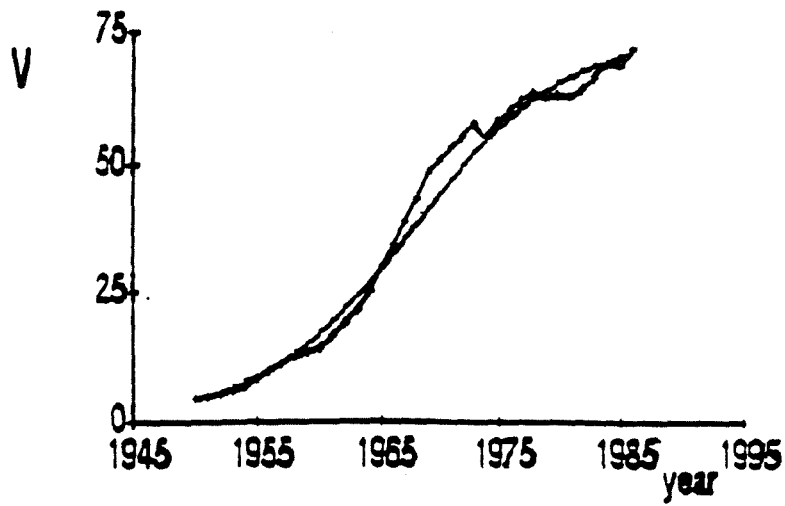
Afbeelding 9. Geschatte waarden voor $(dV/dt)/V$, en $(dF/dt)/F$ voor Nederland, behorend bij een vijftiende graads polynoom.

Afbeelding 10. Geobserveerde aantallen doden in Nederland en de aantallen doden geschat uit de hoeveelheid verkeer zoals beschreven in formule (15).

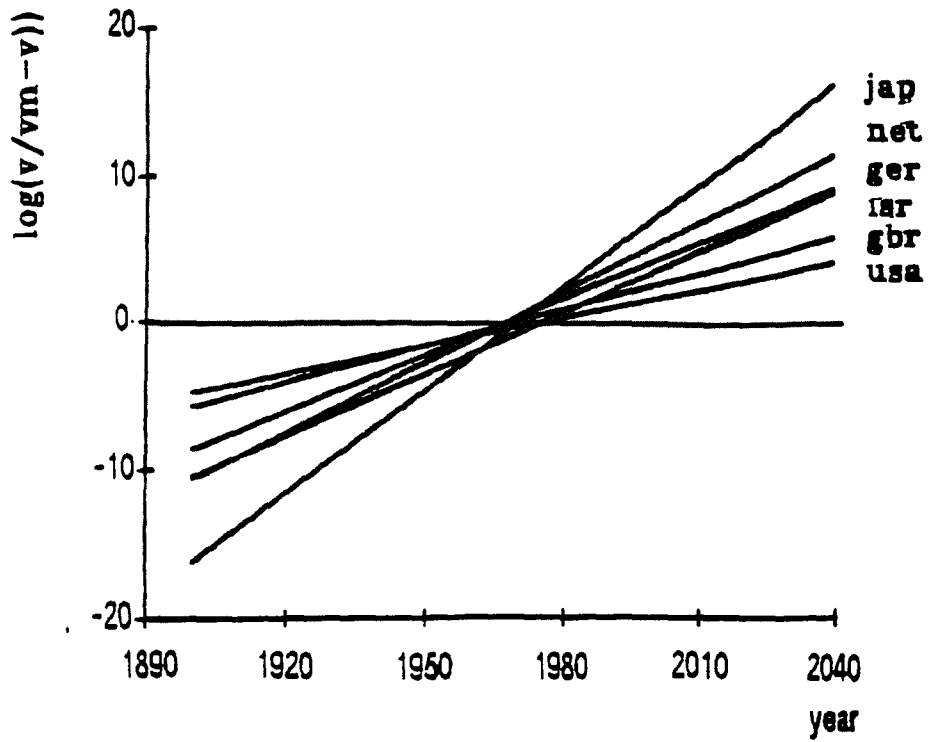
Afbeelding 11. Geobserveerde aantallen gewonden in Nederland en de aantallen gewonden geschat uit de combinatie van de ontwikkeling van het aantal doden en de hoeveelheid verkeer volgens formule (14).



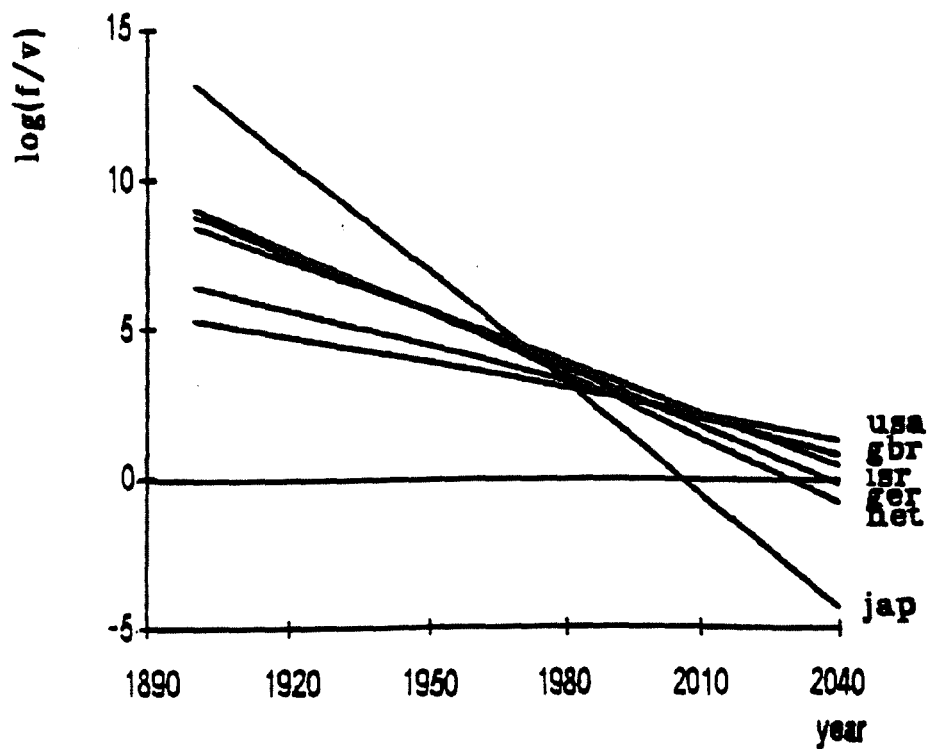
Afbeelding 1. Ontwikkeling van het verkeer, de doden en het dodenquotiënt voor Nederland (Blokpoel, 1982).



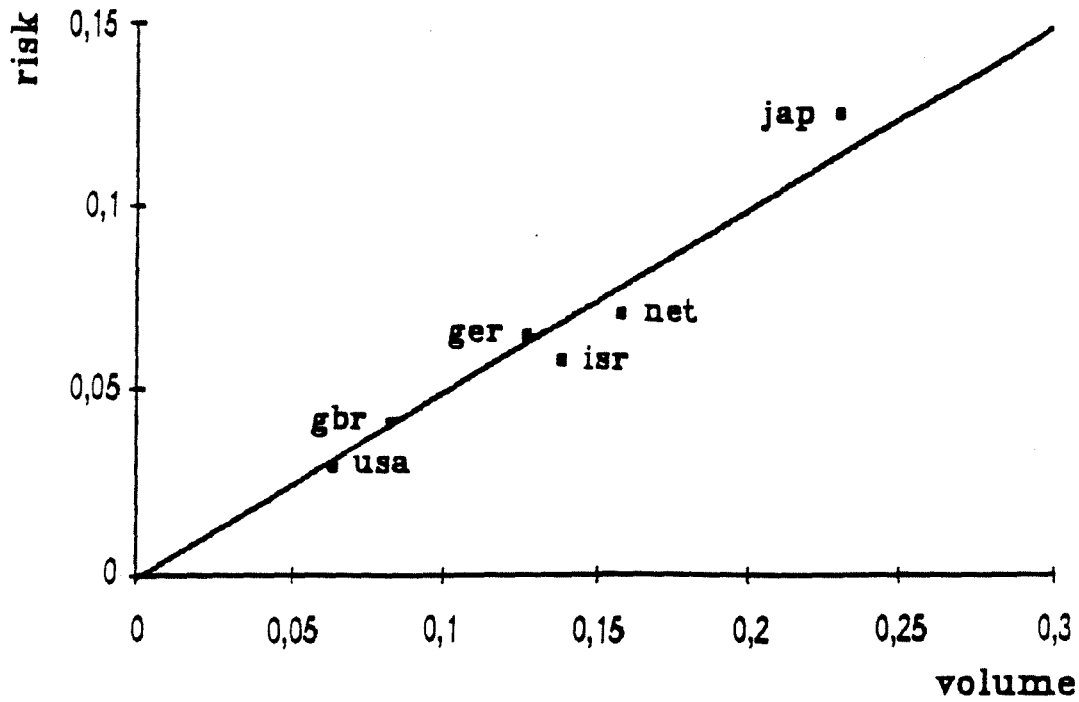
Afbeelding 2. Geschatte en geobserveerde aantallen voertuigkilometers, dodenquotiënten en aantallen doden voor Nederland.



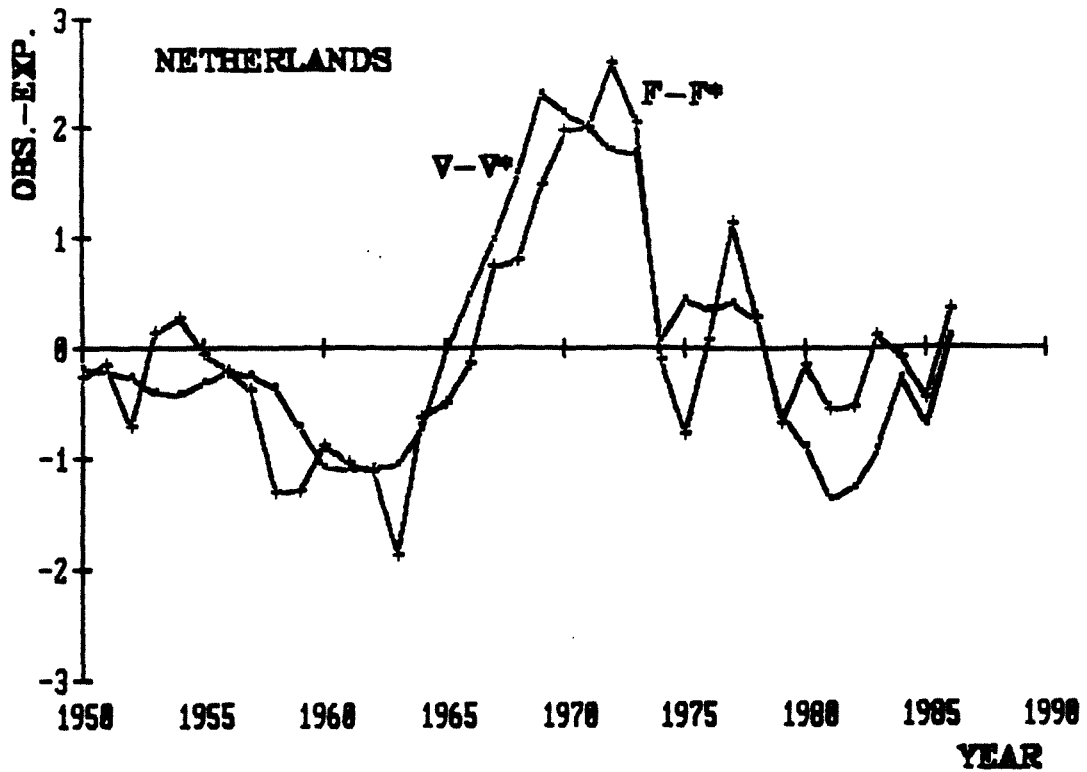
Afbeelding 3. Verwachte waarden voor $\ln(V/(V_m - V))$ voor zes landen.



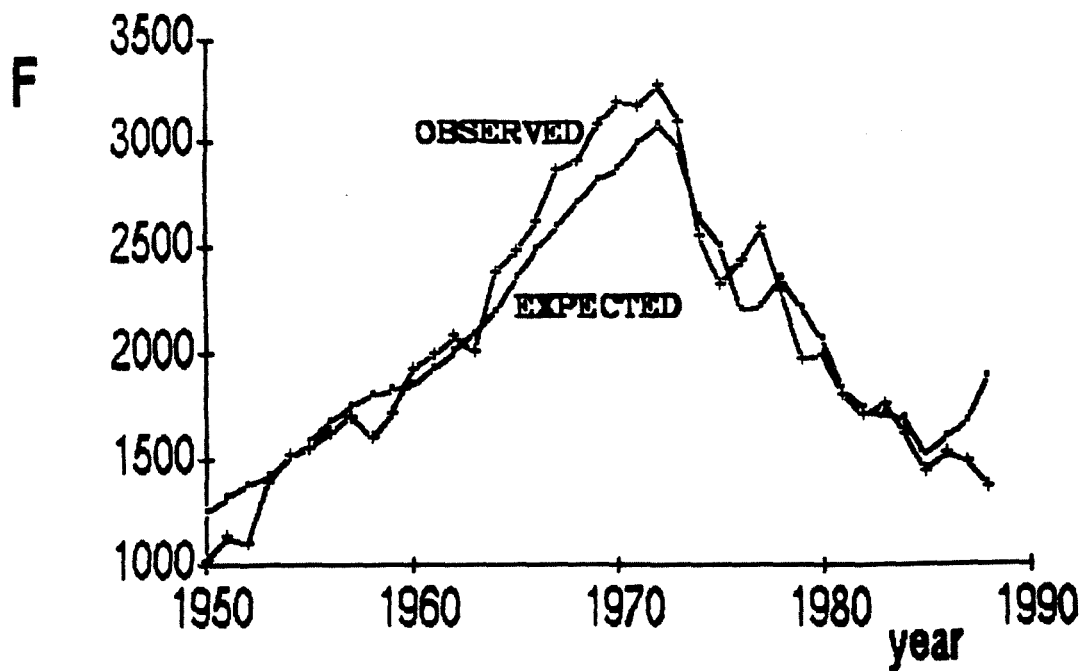
Afbeelding 4. Verwachte waarden voor $\ln(F/V)$ voor zes landen.



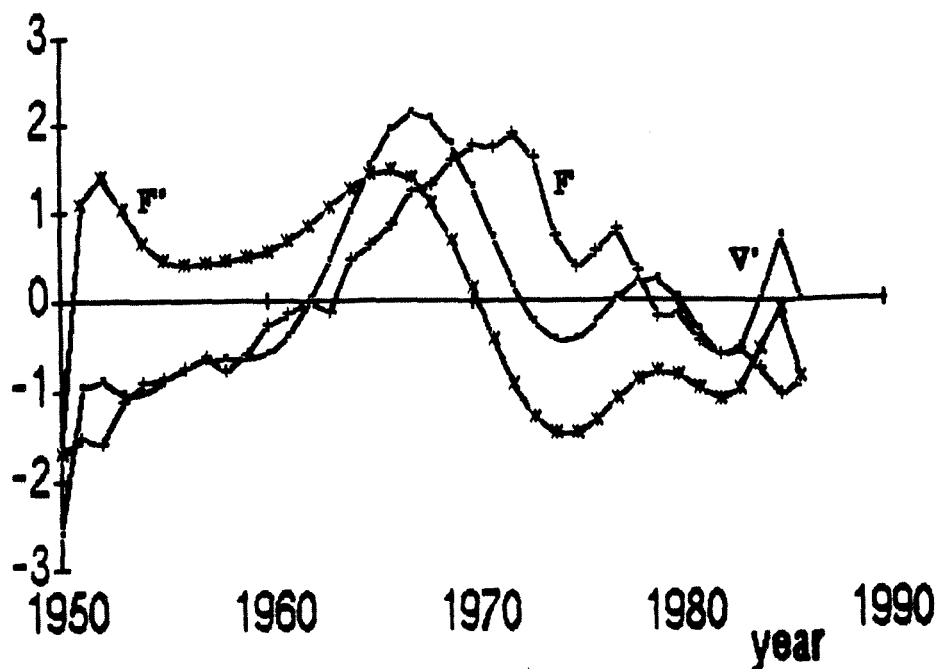
Afbeelding 5. Relatie tussen de parameters a en α voor respectievelijk de verkeersprestaties en dodenquotiënten.



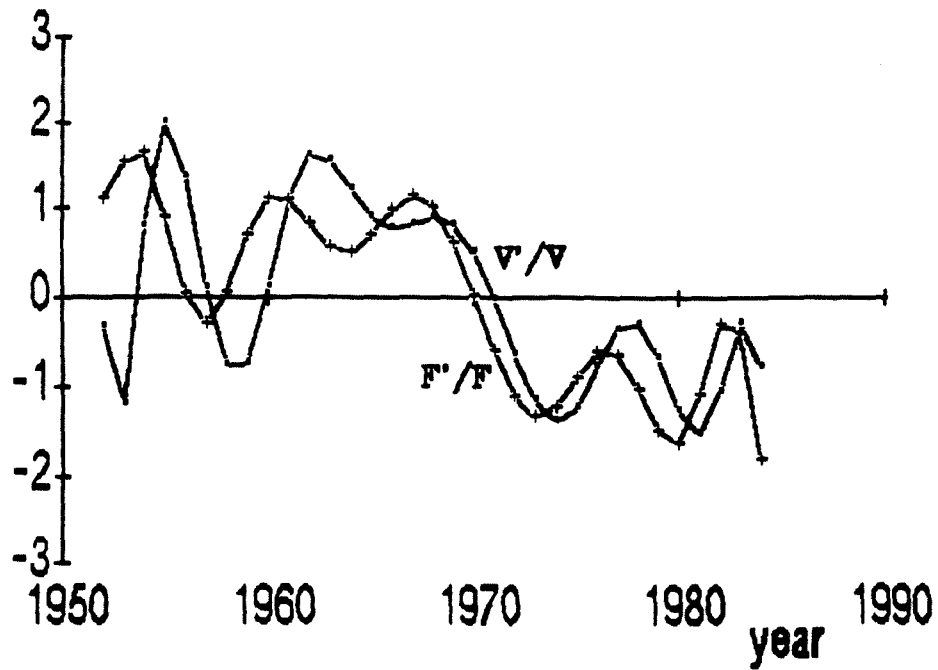
Afbeelding 6. Gestandaardiseerde modelafwijkingen van V en F voor Nederland.



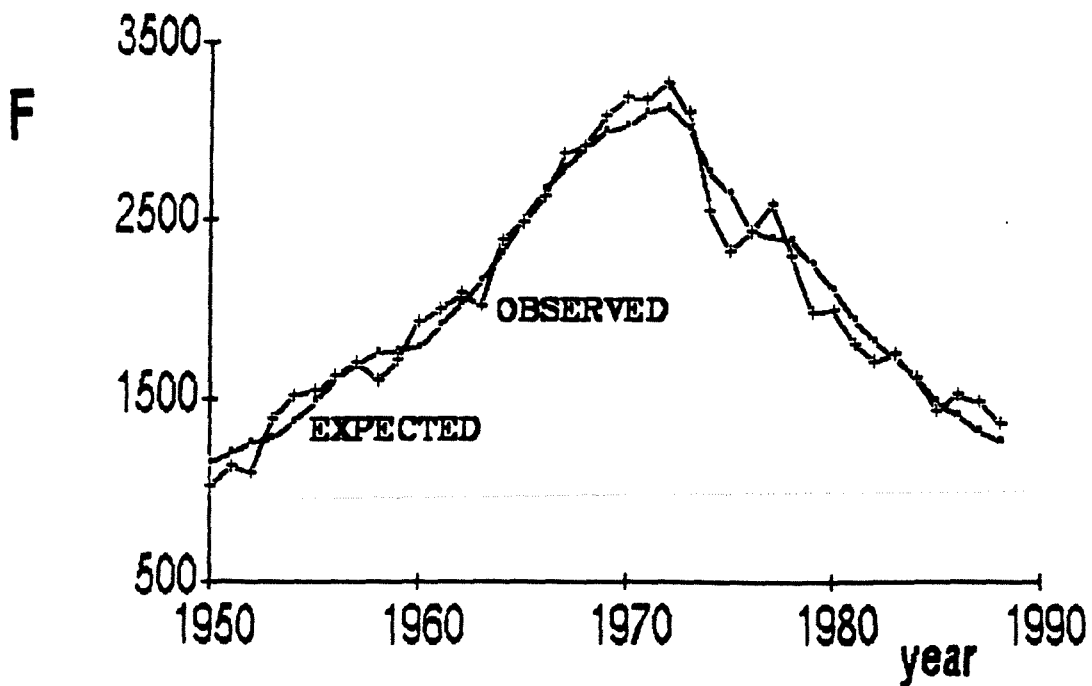
Afbeelding 7. Geobserveerde en geschatte aantallen doden in Nederland voor de combinatie van lange-termijnontwikkelingen en korte-termijnafwijkingen daarvan.



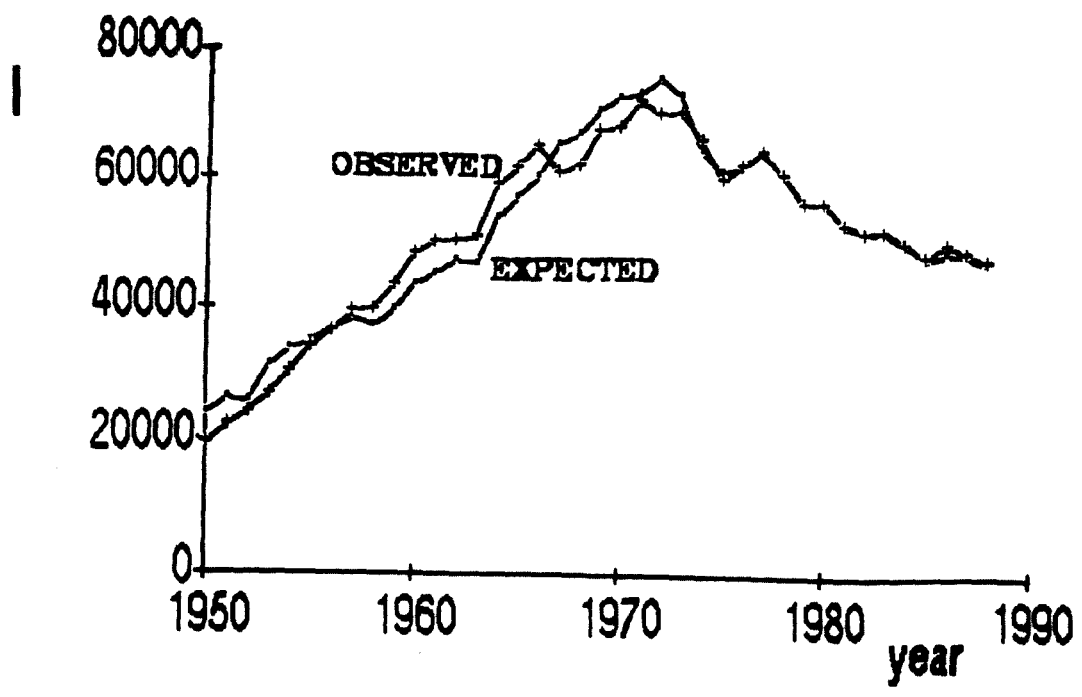
Afbeelding 8. Geschatte waarden voor dv/dt , dF/dt en geobserveerde waarden voor F voor Nederland, behorend bij een elfde graads polynoom.



Afbeelding 9. Geschatte waarden voor $(dV/dt)/V$, en $(dF/dt)/F$ voor Nederland, behorend bij een vijftiende graads polynoom.



Afbeelding 10. Geobserveerde aantallen doden in Nederland en de aantallen doden geschat uit de hoeveelheid verkeer zoals beschreven in formule (15).



Afbeelding 11. Geobserveerde aantallen gewonden in Nederland en de aantallen gewonden geschat uit de combinatie van de ontwikkeling van het aantal doden en de hoeveelheid verkeer volgens formule (14).

TABELLEN 1 EN 2

Tabel 1. Parameters voor het verkeersvolumemodel en het model voor het dodenquotiënt voor zes landen.

Tabel 2. Percentage verklaarde variantie, bij toepassing van een elfde graads polynoom op de aantallen voertuigkilometers en doden voor zes landen.

Land	Jaar	V _{max}	Volume parameters		Ratio parameters	
			a	b	α	β
B.R. Duitsland	1953-1986	407	0,12692	-249,78	-0,06404	130,44
Groot-Brittannië	1950-1985	358	0,08224	-161,96	-0,03997	82,36
Israel	1951-1987	17,9	0,13821	-273,06	-0,05720	117,07
Japan	1950-1985	436	0,23082	-454,89	-0,12479	250,28
Nederland	1950-1988	94	0,13895	-273,84	-0,06782	137,66
Verenigde Staten	1947-1985	4386	0,06355	-125,54	-0,02861	59,66

Tabel 1. Parameters voor het verkeersvolumemodel en het model voor het dodenquotient voor zes landen.

Land	Percentage verklaarde variantie:	
	Doden	Voertuigkilometers
B.R. Duitsland	92,73%	99,81%
Groot-Brittannië	91,05%	99,85%
Israel	97,47%	99,80%
Japan	98,09%	99,91%
Nederland	97,15%	99,83%
Verenigde Staten	95,77%	99,85%

Tabel 2. Percentage verklaarde variantie, bij toepassing van een elfde graads polynoom op de aantallen voertuigkilometers en doden voor zes landen.