

Een introductie op de verkeersstroomtheorie

Met ingang van deze uitgave zal NM Magazine een aantal *tutorials* over (dynamisch) verkeersmanagement opnemen. Ons doel? Een groter publiek kennis laten maken met de principes van en de wetenschappelijke basis onder verkeersmanagement. In deze eerste bijdrage maken we kennis met de verkeersstroomtheorie. Dr. Victor Knoop en dr. ir. Andreas Hegyi van TU Delft praten ons bij over microscopische en macroscopische vergelijkingen, het fundamenteel diagram en de capaciteitsval.

In deze tutorial lichten we enkele principes toe uit de verkeersstroomtheorie. Deze theorie beschrijft hoe verkeer in verschillende situaties 'stroomt' en hoe dat kwantitatief te beschrijven is. Op basis van die kennis kun je (dynamische) verkeersmodellen maken, die je weer kunt gebruiken om verkeersmanagementmaatregelen te ontwerpen en evalueren. De verkeersstroomtheorie is daarmee in feite de 'wetenschappelijke onderlegger' van het vakgebied verkeersmanagement.

In deze bijdrage gaan we uit van verkeersstromen op snelwegen, maar de theorie is ook toepasbaar op andere wegen.

Relatie tussen voertuigen en stroom

Een stroom kun je op verschillende manieren beschrijven. Je kunt je bijvoorbeeld richten op de kleinste elementen van de stroom, de afzonderlijke voertuigen. Dat is de *microscopische* beschrijving. Daartegenover staat de *macroscopische* beschrijving waarbij je niet elk voertuig apart beschrijft, maar waarbij je wegdelen als kleinste elementen beschouwt. In zo'n aanpak werk je met gemiddelden. In tabel 1 benoemden we de grootheden van deze twee benaderingen.

Op het niveau van de voertuigen zijn de volgtijd h , de volgafstand s en de snelheid v van belang. Deze grootheden hebben ook macroscopische tegenhangers. De tegenhanger van de volgtijd is bijvoorbeeld de intensiteit q , die uitdrukt hoeveel voertuigen er langs een bepaald punt komen in een bepaalde periode. Dit kun je uitrekenen met behulp van de gemiddelde volgtijd. Als die 2 seconden is, dan komt er elke seconde gemiddeld 0,5 voertuig voorbij. De intensiteit wordt uitgedrukt in voertuigen per uur (oftewel 3600 seconden) – en de intensiteit bedraagt in dit voorbeeld dus 1800 vtg/h.

Op dezelfde manier verhoudt de voertuigdichtheid k , het aantal voertuigen per lengte-eenheid, zich tot de gemiddelde volgafstand. Als voorbeeld: stel dat de gemiddelde volgafstand 50 meter is, dan zijn er per kilometer $1000 / 50 = 20$ voertuigen op de weg.¹ De dichtheid op het betreffende wegvak is dus 20 vtg/km.

De snelheid van een voertuig heeft als macroscopisch tegenhanger de gemiddelde snelheid u . De berekening van de gemiddelde snelheid is overigens niet triviaal. Hier volstaan we met te melden dat voor de verkeersstroomtheorie de ruimtelijk gemiddelde snelheid nodig is: het gemiddelde van de

MICROSCOPISCH	symbool	eenheid	MACROSCOPISCH	symbool	eenheid	relatie
Volgtijd	h	s	Intensiteit	q	vtg/h	$q = \frac{3600}{\langle h \rangle}$
Volgafstand	s	m	Dichtheid	k	vtg/km	$k = \frac{1000}{\langle s \rangle}$
Snelheid	v	m/s	Gemiddelde snelheid	u	km/h	$u = 3,6 \langle v \rangle$
Relatie	$s = hv$		Relatie	$q = ku$		

Tabel 1: Overzicht van de grootheden op microscopisch en macroscopisch niveau en hun onderlinge verband. De driehoekige haakjes (zoals bij $\langle h \rangle$) geven aan dat het om een gemiddelde gaat.

¹ In dit stuk gaan we voor het gemak uit van volgtijden en volgafstanden inclusief voertuiglengte, wat ook wel nettovolgtijden en -afstanden worden genoemd.



snelheden van de voertuigen die op een moment op een bepaald wegvak zijn. Die verschilt van de tijdsgemiddelde snelheid, die op basis van bijvoorbeeld lusmetingen wordt bepaald.

Fundamentele relatie

Op microscopisch niveau is er een strikt verband tussen de variabelen. Immers, de volgafstand is de volgtijd maal de snelheid:

$$s = hv \quad (1)$$

volgafstand = volgtijd x snelheid

Als twee van de variabelen bekend zijn, kan de derde met deze vergelijking worden berekend. Na enkele wiskundige manipulaties met deze formule is het ook mogelijk een macroscopische vergelijking op te stellen:

$$q = ku \quad (2)$$

intensiteit = dichtheid x gem. snelheid

Deze vergelijking is intuïtief ook juist. Stel je een stuk weg voor waar een aantal voertuigen rijdt. Dan zul je langs de kant van de weg een zekere verkeersintensiteit waarnemen (de hoeveelheid auto's die in een periode langskomt). Als alle voertuigen nu een factor twee sneller gaan rijden, zal deze intensiteit verdubbelen. Ook bij verdubbeling van de dichtheid (twee keer zoveel auto's), zal de intensiteit verdubbelen. De intensiteit is dus, geheel conform vergelijking 2, proportioneel met zowel de snelheid als de dichtheid.

Ook voor deze tweede vergelijking geldt dat als er twee grootheden bekend zijn, je de derde grootheid kunt berekenen.

De factor gedrag

Als je puur op basis van vergelijking 2 redeneert, zou je kunnen concluderen dat om de intensiteit q van een weg op te schroeven, je alleen maar de gemiddelde snelheid u of de dichtheid k hoeft te verhogen. In de praktijk blijkt echter dat er ook een fundamentele relatie is tussen de gereden snelheid en de dichtheid, of in microscopische termen, tussen de snelheid en de volgafstand. Dat heeft alles te maken met de factor gedrag. Bij hogere snelheden rijdt de gemiddelde bestuurder namelijk op een grotere afstand van z'n voorganger: de dichtheid is dan lager. Omgekeerd geldt dat als de volgafstand afneemt (de dichtheid toeneemt), de weggebruiker automatisch zijn snelheid zal minderen.

Nu is de relatie tussen snelheid en dichtheid zodanig dat

bij lage dichtheden het verkeer sneller zal rijden. Maar omdat de gemiddelde snelheid nooit veel hoger wordt dan de maximumsnelheid, blijft de resulterende intensiteit laag. Bij lage snelheden, bij een file dus, kan de dichtheid hoog worden. Er komt echter een punt waarop de snelheid meer daalt dan de dichtheid stijgt – en vanaf dat punt daalt de intensiteit bij een toenemende dichtheid. Conclusie: er is een zekere optimale combinatie snelheid-dichtheid waarop de intensiteit op z'n hoogst is. Die maximale intensiteit noemen we de capaciteit.

Fundamenteel diagram

Het bovenstaande wordt extra duidelijk als we de relaties grafisch weergeven in het *fundamenteel diagram*. Dit diagram is er in drie vormen, voor de drie relaties dichtheid-intensiteit, intensiteit-snelheid en dichtheid-snelheid. De meest gebruikelijke vorm is het dichtheid-intensiteitdiagram – zie de figuur op de volgende bladzijde.

We kunnen een aantal punten in de grafiek gemakkelijk identificeren. Helemaal linksonder is de weg leeg. Helemaal rechtsonder is sprake van een verkeersinfarct: er zijn veel auto's (hoge dichtheid), maar ze staan allemaal stil (de intensiteit is nul). Tussen deze twee uitersten is er rijdend verkeer. Het punt waarop de intensiteit het hoogst is, is de eerder genoemde capaciteit: de combinatie snelheid-dichtheid is dan optimaal. Vóór dit punt betekent meer verkeer (een hogere dichtheid) ook vanzelf een hogere intensiteit. Voorbij dit punt, het oranje-rode gedeelte in de grafiek, zorgt een toename van de dichtheid juist voor een afname van de intensiteit.

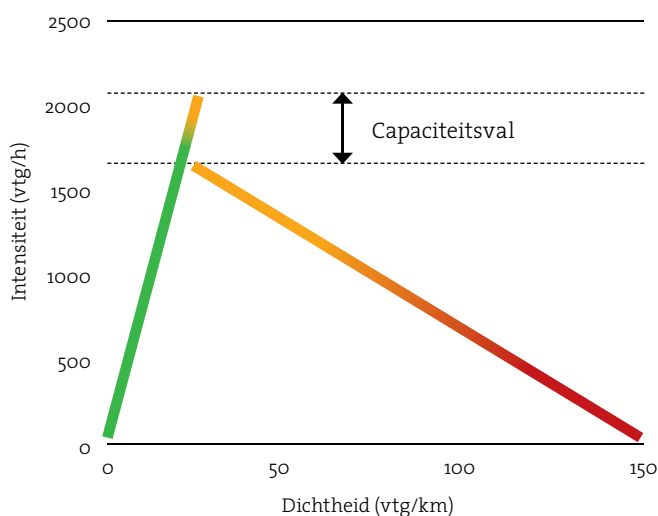
Goed beschouwd vormt deze vaststelling het bestaansrecht van verkeersmanagement. In het groene gedeelte van de grafiek is ingrijpen nog overbodig: het verkeer is dan nog prima in staat zichzelf te organiseren. Maar als op een weg het aantal voertuigen de kritische grens nadert en je zou als wegbeheerder niets doen, dan stagneert de boel. Verstandig en tijdig ingrijpen – verkeersmanagement dus – is dan gewenst. Dat is wat het fundamenteel diagram met één lijn duidelijk maakt!

Capaciteitsval

Maar hoe kun je verstandig ingrijpen? Daar is veel over te zeggen, maar laten we in deze eerste tutorial kort stilstaan bij één aanpak: het voorkomen van de *capaciteitsval*.

We hebben in het voorgaande al gesteld dat het gedrag van verkeersdeelnemers een bepalende factor is. Dat zien we ook als we inzoomen op ons gedrag bij het verlaten van een file. Zoals we hebben gezien wordt de intensiteit bepaald door de gemiddelde volgtijd van de bestuurders – zie tabel 1. Bijzonder is

dat bestuurders een langere volgtijd aanhouden nadat ze een lagere snelheid hebben moeten aanhouden, bijvoorbeeld doordat ze in de file stonden. Dat betekent dat het verkeer dat een file uitrijdt, grote gaten creëert in de stroom, wat leidt tot een intensiteit die beduidend lager is dan de eigenlijke capaciteit. Dit noemen we de capaciteitsval: de 'knip' in de afbeelding van het fundamenteel diagram. De grootte van de val hangt samen met het type van de file, bijvoorbeeld filegolven of files bij toeritten. Er zijn verder aanwijzingen dat de capaciteitsval ook afhangt van de duur van de file en de snelheid in de file. Naar de grootte en de precieze aard van de capaciteitsval wordt nog onderzoek gedaan, maar duidelijk is dat het gemiddeld genomen gaat om een intensiteitsafname van 5 tot 30 procent.



Een schematische weergave van de capaciteitsval. De linkerlijn geeft het verkeer in vrije afwikkeling weer. De snelheid is constant en van links naar rechts nemen de dichtheid en de intensiteit toe, totdat de capaciteit wordt bereikt. De rechterlijn geeft het verkeer in file weer, waarbij van rechts naar links de dichtheid afneemt, de snelheid toeneemt, wat overeenkomt met verkeer dat de file uitrijdt. De intensiteit neemt (van rechts naar links) ook toe, maar bereikt de vrije capaciteit niet volledig.

Dit begrip staat aan de basis van enkele slimme verkeersmanagementmaatregelen. Want omgekeerd geredeneerd geldt dat als de wegbeheerder erin slaagt een file te voorkomen (of uit te stellen), de uiteindelijke doorstroming tientallen procenten hoger kan liggen. Dat is het principe achter bijvoorbeeld toeritdoserings bij snelwegen. Door op het juiste moment een toeritdoseringsinstallatie aan te zetten knijpt je de instroom, voorkom je file op de snelweg en voorkom je dus ook de capaciteitsval.

Een ander voorbeeld is het Specialist-algoritme dat filegolven helpt oplossen met behulp van dynamische maximumsnelheden. Filegolven, ook wel spookfiles genoemd, ontstaan als het wat drukker is. Er hoeft dat maar één automobilist iets te hard op zijn rem te staan, en er ontstaat achter hem een file met een hoge dichtheid en zeer lage snelheid. De spookfile verplaatst zich als een golf tegen de richting van het verkeer in (met een snelheid van zo'n 18 km/h) en kan langer dan een uur blijven aanhouden. Het vervelende is niet alleen de file als zodanig, maar ook de capaciteitsval die daardoor ontstaat. Daarom is het belangrijk om de filegolf zo snel mogelijk 'tot stilstand te brengen'. Het basisprincipe van het Specialist-algoritme is dat de intensiteit van het verkeer dat de file inrijdt via dynamische maximumsnelheden wordt beperkt. De filegolf wordt zo geneutraliseerd – en daarmee wordt voor het inrijdende verkeer ook de capaciteitsval voorkomen.² Wederom een 'winst' van 5 tot 30 procent!

Conclusie

De inzicht die we hier hebben kunnen geven in de verkeerskundige theorie en de praktijk is beperkt: er zijn nog meer oorzaken voor suboptimaal presterende verkeersnetwerken, en de praktijk is weerbarstiger dan de simpele voorstelling die we in deze eerste tutorial hebben kunnen geven. Maar duidelijk is dat de verkeersstroomtheorie ons kan helpen om het verkeersgedrag beter te begrijpen en om slimme verkeersmanagementmaatregelen te ontwerpen en te evalueren! [\[1\]](#)

De auteurs

Dr. Victor Knoop is universitair docent aan de TU Delft op het gebied van modelleren van verkeersstromen. Tevens is hij verbonden aan TrafficQuest, het nationale kenniscentrum voor verkeersmanagement.

Dr. ir. Andreas Hegyi is universitair docent aan de TU Delft op het gebied van verkeersmanagement.

De capaciteit van Nederlandse snelwegen

Als we een fundamenteel diagram voor de Nederlandse snelwegen zouden tekenen, dan hoort bij de top van dat diagram – de capaciteit – een gemiddelde snelheid van

85-90 km/h. Bij die snelheid durven we een gemiddelde volgtijd van 1,6 seconde aan te houden. Er is dan een dichtheid mogelijk van 25 vtg/km/rijstrook. Dat samen resulteert in een capaciteit van zo'n 2250 voertuigen per uur per rijstrook.

Denk echter niet dat het 'dus' slim is om op alle snelwegen een maximumsnelheid van 85-90 km/h in te voeren. Bij zo'n redenering zie je over het hoofd dat er voor

het bereiken van de capaciteit voldoende verkeer moet zijn. Als de dichtheid laag is (het is rustig op de weg) kan de snelheid gerust omhoog – de snelheid op 85-90 houden zou dan alleen maar de reistijd verlengen. De crux is dat de capaciteit wordt bereikt bij een ideale combinatie van een zekere snelheid én een zekere dichtheid. Alleen die 'ideale' snelheid of dichtheid nastreven heeft dus geen zin.

² Het Specialist-algoritme is getest op de A12 tussen Bodegraven en Woerden. Het is recentelijk weer in werking gesteld na de verbreding van dat traject.