



Sluipverkeer in dorpskernen in provincie Utrecht voorkomen met verkeersborden

Scriptie Berinda van Dijk

Opleiding
Stageperiode

Toegepaste Wiskunde
13 november 2023 tot en met 15 maart 2024

Bedrijfsbegeleider
Docentbegeleider
Tweede lezer

Kevin Otjes
Karin De Smidt - Destombes
Joyce MacDuff

Samenvatting

Deze scriptie is een afstudeerproduct voor de opleiding Toegepaste Wiskunde bij de Haagse Hogeschool. De scriptie is geschreven bij KBenP, een bedrijf met verschillende werkzaamheden in de data en IT. De scriptie gaat over sluipverkeer: er wordt onderzocht of het mogelijk is om verkeer zo om te leiden met verkeersborden dat er minder sluipverkeer is. Daarom is de hoofdvraag van dit onderzoek:

Met welke maatregelen, die in te stellen zijn met verkeersborden, wordt sluipverkeer in dorpskernen zoveel mogelijk voorkomen, zonder dat voertuigen hierdoor een onacceptabel langere reistijd krijgen?

Om te bepalen waar dorpskernen zijn, is gebruik gemaakt van grenzen van de bebouwde kom.

Er bleek in meerdere gemeenten in provincie Utrecht sprake te zijn van sluipverkeer. Hiervan bleek Gemeente Vijfheerenlanden de meest geschikte voor dit onderzoek, daarom is dit onderzoek gericht op die gemeente.

Er is een dataset gebruikt van voertuigen die elke paar seconden hun positie en snelheid registreren. Met deze data is bepaald hoeveel verkeer vanaf welke plek naar welke plek is gegaan. Dit is de *vervoersvraag*.

Een *verkeerstoedeling* is een verdeling van het verkeer uit de vervoersvraag over het wegennet. De twee belangrijkste toedelingen in dit onderzoek zijn:

- a. Het *gebruikersevenwicht*: een toedeling waarin geen enkele verkeersdeelnemer zijn reistijd kan verkleinen door een andere route te kiezen. Deze toedeling benadert de werkelijkheid.
- b. Een toedeling waarin de opgetelde reistijd van de verkeersdeelnemers wordt geminimaliseerd, en de reistijd binnen de bebouwde kom extra zwaar weegt.

Er worden in dit onderzoek twee verkeersmaatregelen meegenomen die uit te voeren zijn met verkeersborden. Hieronder staat per maatregel uitgelegd hoe de wegen worden gekozen waar de maatregel moet worden uitgevoerd.

- 1) Maatregel 1: het sluiten van wegen. Om te bepalen welke wegvakken moeten worden gesloten om sluipverkeer te verminderen, wordt eerst een verkeerstoedeling gemaakt volgens toedeling b, waarbij wordt geforceerd dat er minstens 1 weg niet gebruikt wordt. De wegen waar bij deze verkeerstoedeling geen verkeer over gaat, zijn wegen die wellicht gesloten kunnen worden om sluipverkeer te verminderen.
- 2) Maatregel 2: het verlagen van de maximumsnelheid van wegvakken. Om te bepalen op welke wegvakken dit moet gebeuren, wordt eerst een verkeerstoedeling gemaakt volgens toedeling b. Deze wordt vergeleken met de situatie bij toedeling a. De wegen waar de maximumsnelheid moet worden verlaagd zijn de wegen waar bij toedeling a veel meer verkeer overheen gaat dan bij toedeling b.

Het effect van een maatregel is na te gaan door de gevonden aanpassingen van die maatregel aan het wegennet te doen, daarna toedeling a uit te voeren, en deze te vergelijken met toedeling a bij het oorspronkelijke wegennet. Uit het onderzoek blijkt dat maatregel 1 weinig effect heeft, omdat de wegen die worden gesloten in de huidige situatie al weinig verkeer hadden. Maatregel 2 had meer effect: hier was er zowel in de ochtend- als in de avondspits een vermindering van sluipverkeer in dorpskernen, want de totale reistijd in de bebouwde kom van doorgaand verkeer nam af door maatregel 2. De methodiek van maatregel 2 is dus geschikt om sluipverkeer te verminderen. In vervolgonderzoek kan worden onderzocht wat er gebeurt als de maximumsnelheid veranderd in beide richtingen van wegen, in plaats van in slechts 1 richting zoals in dit onderzoek is gedaan.

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	2
Inhoudsopgave	3
Begrippenlijst & symbolenlijst	5
1. Inleiding.....	6
1.1. Opdrachtgever: KBenP & Analyze.....	6
1.2. Context & Aanleiding	6
1.3. Doel, belang.....	6
1.4. Onderzoeksvragen	7
1.5. Methodiek	7
1.6. Afbakening.....	7
1.7. Leeswijzer	8
2. Situatiebeschrijving & contextueel literatuuronderzoek	9
2.1. Operationalisatie begrippen	9
2.2. Sluipverkeer in provincie Utrecht	10
2.3. Vrachtverkeer	13
2.4. Literatuur: Maatschappelijk gewenste routes	13
2.5. Verkeersborden	14
2.6. Conclusies	16
3. Dataverkenning & data-analyse	17
3.1. Dataverkenning.....	17
3.2. Data-analyse	18
3.3. Conclusies	21
4. Wiskundige modellen.....	22
4.1. Verkeerstoeiding over een netwerk	22
4.2. Wegennet optimaliseren	24
4.3. Conclusies	28
5. Onderzoeksopzet	29
5.1. Wegvakkentabel maken.....	29
5.2. Vervoersvraag-tabel maken	29
5.3. Geïmplementeerde todelingsmethodieken	31
5.4. Onderzoeksopzet verkeersmaatregelen	34
5.5. Doelfunctie(s)	34
5.6. Conclusie.....	35
6. Resultaten	36
6.1. Controle aannemelijkheid	36
6.2. Effecten van maatregelen	42
6.3. Doelfunctiewaarden en interpretatie daarvan	47

6.4.	Invloed op de ochtendspits	49
6.5.	Maatregelen in de praktijk.....	50
6.6.	Uitgangspunten	51
6.7.	Conclusie.....	51
7.	Conclusies	52
8.	Discussie & aanbevelingen.....	54
8.1.	Wegvakken.....	54
8.2.	Voertuig-categorieën	54
8.3.	Herkomsten en bestemmingen	54
8.4.	Overig	55
	Bronnenlijst	56
Bijlage I	Datakolommen	59
Bijlage II	Bepalen wegingsfactoren Floating Car Data met lusdata	61
Bijlage III	Wegkenmerken bepalen	65
Bijlage IV	Definiëren bebouwde kom.....	67
Bijlage V	Ruwe tabel doelfunctiewaarden avondspits.....	68

Begrippenlijst & symbolenlijst

Begrippenlijst

Tabel 1 Begrippenlijst

Free-flow	Situatie waarin verkeer geen hinder heeft van ander verkeer, en dus kan rijden met de snelheid van de snelheidslimiet van een weg.
Congestie	File of langzaamrijdend verkeer
Intensiteit	Het aantal voertuigen per uur op een weg
Capaciteit	Het maximum aantal voertuigen per uur op een weg
Graaf	Een wiskundig woord voor een soort 'netwerk' van punten en lijnen. Voorbeelden van dingen die met grafen kunnen worden weergegeven zijn het wegennet, of bijvoorbeeld een netwerk van mensen.
HB	Afkorting voor 'Herkomst-Bestemming': een 'reis' of een 'route' heeft een beginpunt (de 'herkomst') en een eindpunt (de 'bestemming'). Meerdere voertuigen kunnen dezelfde herkomst en dezelfde bestemming hebben, en er kunnen meerdere routes worden gebruikt tussen dezelfde herkomst en dezelfde bestemming.
Link, lijn	Een verbinding tussen twee punten in een graaf
Node	Een punt in een graaf
wegvak	In datasets over wegen is een weg vaak opgedeeld in meerdere wegvakken. Een wegvak loopt meestal van kruispunt naar kruispunt.
Doelfunctie	Formule waarmee berekent wordt hoe 'goed' een oplossing is. Een voorbeeld van een doelfunctie (uitgedrukt in woorden) is: 'som van alle reistijden'.

Symbolenlijst

Tabel 2 Symbolenlijst

a	wegvak
A	Verzameling van alle wegvakken
t_a	Reistijd op wegvak a
x_a	Intensiteit (=flow) op wegvak a
r	Route
R	Verzameling van alle routes
R_{hb}	Verzameling van alle routes tussen herkomst h en bestemming b
f_r	Intensiteit (=flow) op route r
a_r	Een van de wegvakken in route R
A_r	Alle wegvakken in route R
l_a	Lengte van wegvak a
k_a	Lengte van het deel van wegvak a dat in de bebouwde kom valt
c_r	Aantal links (=count) in route r
V_{hb}	Vervoersvraag tussen herkomst h en bestemming b
HB	Alle herkomst-bestemmingsparen
frc_a	De 'Functional Road Class' van wegvak a . De Functional Road Class is een maat voor hoe groot een weg is.

1. Inleiding

1.1. Opdrachtgever: KBenP & Analyze

Deze scriptie wordt geschreven bij KBenP. KBenP is een bedrijf met verschillende werkzaamheden in de data en IT. Een van de bedrijven die onder KBenP vallen is Analyze. Analyze werkt voornamelijk voor opdrachtgevers in de (semi-)publieke sector. Analyze heeft twee soorten opdrachten. Enerzijds zijn er opdrachten die te maken hebben met het dataloket: een applicatie waarmee bedrijven hun interne data goed doorzoekbaar kunnen maken. Anderzijds zijn er opdrachten die te maken hebben met 'Smart City'. Deze Smart City-projecten gaan over woningbouw, mobiliteit, natuur en/of het sociale domein. Zowel bij de dataloket-opdrachten als bij de Smart-City-opdrachten maakt Analyze meestal digitale kaarten om data te visualiseren. Ook in deze scriptie wordt gebruik gemaakt van kaarten.

Deze scriptie gaat over sluipverkeer: verkeer dat bijvoorbeeld bij drukte een route neemt die daar minder voor bedoeld is.

1.2. Context & Aanleiding

Smart Mobility betekent letterlijk vertaald: 'slim vervoer'. Rijkswaterstaat (z.d.) noemt als betekenis: "De digitalisering en automatisering van de mobiliteit". Met Smart Mobility kunnen verschillende doelen worden nagestreefd. Provincie Utrecht (z.d) noemt "veiliger vervoer, een betere doorstroming, goede bereikbaarheid en verbetering van leefbaarheid". Smart Mobility is een belangrijk thema binnen gemeenten en provincies, omdat Smart Mobility hen kan helpen om hun doelen wat betreft mobiliteit te halen. Zo heeft adviesbureau Goudappel de mogelijke impact van Smart Mobility op de provinciale doelen van provincie Noord-Holland onderzocht. Ze concludeerden dat met Smart Mobility vooral de verkeersveiligheid, duurzaamheid en bereikbaarheid kan verbeteren (Goudappel, 2021).

Een concept wat valt onder Smart Mobility is 'maatschappelijk gewenste routeplanning': het maken van routes die plekken zoals scholen en dorpskernen mijden. Met maatschappelijk gewenste routeplanning kan sluipverkeer langs ongewenste routes worden voorkomen.

Analyze hoort van meerdere wegbeheerders dat er sprake is van sluipverkeer en dat er hierdoor negatieve effecten worden ervaren, zoals verkeersonveiligheid en beschadigde bermen. Sluipverkeer wordt in dorpskernen relatief snel als overlastgevend ervaren, omdat er daar relatief veel mensen wonen en leven. Daarom is gekozen om in deze scriptie onderzoek te doen naar het omleiden van sluipverkeer in dorpskernen.

Er is gekozen om onderzoek te doen naar het gebruik van verkeersborden bij het omleiden van het sluipverkeer, omdat verkeersborden dwingend zijn. Hierdoor is het effect van de verkeersborden goed te voorspellen. Routekeuze-maatregelen in andere vormen (bijvoorbeeld navigatieapps) hoeven niet opgevolgd te worden, waardoor het effect hiervan lastiger te voorspellen is. Ook maatregelen die routes minder comfortabel maken (zoals verkeersdrempels) zijn lastiger te modelleren en daarom niet meegenomen.

1.3. Doel, belang

Het doel van dit onderzoek is om verkeer zo om te leiden met verkeersborden dat alle voertuigen samen zo min mogelijk tijd in de dorpskernen zijn, maar ook niet te ver om moeten rijden.

- Door het verminderen van sluipverkeer hebben gemeenten minder last van de negatieve effecten van sluipverkeer zoals beschadigde bermen, overlast en onveiligheid. Ook verbetert de bereikbaarheid van de dorpskernen, doordat de wegen van en naar het dorp niet meer overmatig gebruikt worden door het sluipverkeer.
- Door te zorgen dat het verkeer niet te ver om moet rijden, wordt gezorgd dat het verkeer een acceptabele reistijd behoudt.

Het eindproduct is een keuze van aanpassingen aan wegvakken die zorgen dat sluiptverkeer door dorpskernen in de provincie Utrecht waar mogelijk wordt voorkomen, zonder dat dit verkeer een te grote reistijd krijgt.

1.4. Onderzoeksvragen

Hoofdvraag

Met welke maatregelen, die in te stellen zijn met verkeersborden, wordt sluiptverkeer in dorpskernen zoveel mogelijk voorkomen, zonder dat voertuigen hierdoor een onacceptabel langere reistijd krijgen?

Deelvragen

1. Wat is sluiptverkeer, en waar in provincie Utrecht is het op dit moment een probleem?
2. Welke verkeersborden worden in dit onderzoek meegenomen?
3. Welke data is er beschikbaar om te gebruiken in dit onderzoek?
4. Welke methodieken worden in de literatuur gebruikt om de maatregelen te plannen die horen bij de verkeersborden in deelvraag 2?
5. Hoe zijn die methodieken te combineren tot een model dat geschikt is voor dit onderzoek?

1.5. Methodiek

Deel-vraag	Soort onderzoek	Activiteit	Resultaat
1	Literatuuronderzoek	Definitie sluiptverkeer opstellen	Definitie sluiptverkeer
	Literatuuronderzoek, deskresearch	Inlezen in verschillende casussen van sluiptverkeer	Keuze van gemeente in provincie Utrecht waar er veel sprake is van sluiptverkeer
2	Deskresearch	Opzoeken welke verkeersborden er zijn	Keuze van welke verkeersborden er wel of niet worden meegenomen in dit onderzoek
3	Deskresearch	Inlezen in documentatie	Overzicht van welke tabellen er gebruikt gaan worden in dit onderzoek, welke informatie die tabellen bevatten, en waar op moet worden gelet bij het gebruik van de tabellen
4	Literatuuronderzoek	Inlezen in de literatuur	Keuze van welke artikelen en welke modellen gebruikt gaan worden in dit onderzoek
5	Wiskunde	Opstellen van een onderzoeksopzet en van een wiskundig model	Een onderzoeksopzet en een wiskundig model, waarmee de hoofdvraag kan worden beantwoord

1.6. Afbakening

- Er wordt onderzocht hoe sluiptverkeer in de huidige situatie verminderd kan worden. Sluiptverkeer door geplande en ongeplande werkzaamheden, wegafsluitingen en ongelukken valt dus niet binnen de scope van dit onderzoek.
- In dit onderzoek wordt alleen de situatie in de ochtend- en avondspits onderzocht, omdat dit meestal de drukste momenten van de dag zijn. Met behulp van data over reisbewegingen wordt in paragraaf 3.2 onderzocht of er inderdaad alleen/vooral in de spits sprake is van sluiptverkeer in de dorpskernen in provincie Utrecht.
- Locatie
 - Sluiptverkeer in dorpskernen wordt als extra vervelend ervaren, omdat hier relatief veel mensen rondom de wegen leven. Daarom is het doel van dit onderzoek om

sluipverkeer in dorpskernen te voorkomen, ook als dit zorgt dat buiten dorpskernen juist meer sluipverkeer is.

- Wegbeheerders werken wat betreft data-vraagstukken samen in RDT's: Regionale Data Teams. Daarom wordt in deze scriptie het sluipverkeer in één RDT onderzocht. Analyze heeft het beste contact met 'RDT Noord-Holland & Flevoland' en 'RDT Midden-Nederland'. Aangenomen kan worden dat er in RDT Midden-Nederland meer sluipverkeer is dan in de andere RDT, omdat er in het midden van Nederland waarschijnlijk relatief veel bestemmingsverkeer is. Daarom beperkt dit onderzoek zich tot RDT Midden-Nederland. Omdat dit gebied overeenkomt met provincie Utrecht, wordt in het vervolg van dit onderzoek gesproken over 'provincie Utrecht'.
- Verkeer van en naar andere gebieden via provincie Utrecht wordt ook meegenomen.
- Verkeersborden
 - Er is gekozen om verkeer om te leiden met verkeersborden, omdat verkeersborden dwingend zijn, en het effect van de verkeersborden hierdoor goed te voorspellen is. Routekeuze-maatregelen in andere vormen (bijvoorbeeld navigatieapps) hoeven niet opgevolgd te worden. Ook maatregelen die routes minder comfortabel maken (zoals verkeersdrempels) zijn lastiger te modelleren en daarom niet meegenomen.
 - Er worden alleen geselecteerde verkeersborden uit categorie A en categorie C gebruikt, dit zijn de borden voor maximumsnelheden en 'geslotenverklaringen'. Indien nodig kunnen de verkeersborden worden aangevuld worden met onderborden. In paragraaf 2.5 wordt dit verder uitgewerkt.
 - Er mogen verkeersborden worden toegevoegd, weggehaald en aangepast.

1.7. Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de context van dit onderzoek bestudeerd: er wordt bijvoorbeeld onderzocht waar in provincie Utrecht sprake is van sluipverkeer, en wat er in de literatuur te vinden is over sluipverkeer. Ook bevat dit hoofdstuk de keuze van verkeersborden en verkeersmaatregelen die mee worden genomen in het onderzoek.

In hoofdstuk 3 komen de datasets aan bod. Hier wordt verteld wat de belangrijkste kolommen zijn van de datasets, en wat eventuele aandachtspunten zijn bij het gebruik van de tabellen.

In hoofdstuk 4 wordt ingegaan op wiskundige modellen voor berekeningen in de verkeerskunde, bijvoorbeeld voor reistijd en voor de kortste route.

In hoofdstuk 5 wordt, onder andere met de modellen uit hoofdstuk 4, een onderzoeksopzet gemaakt. Vervolgens worden in hoofdstuk 6 de resultaten besproken. Ook wordt in dit onderzoek nagegaan of de uitkomsten realistisch zijn.

Tot slot staan in hoofdstuk 7 de conclusies, en in hoofdstuk 8 de discussie en aanbevelingen.

2. Situatiebeschrijving & contextueel literatuuronderzoek

In dit hoofdstuk wordt deelvraag 1 beantwoord: “Wat is sluipverkeer, en waar in provincie Utrecht is het op dit moment een probleem?”. Ook wordt in dit hoofdstuk vastgelegd hoe de gebieden worden bepaald die vallen onder ‘dorpskernen’, en wat er al aan onderzoek is gedaan naar maatschappelijk gewenste routeplanning. Tot slot wordt een overzicht gegeven van verkeersborden die in dit onderzoek worden gebruikt.

2.1. Operationalisatie begrippen

Definitie sluipverkeer, sluipteg, sluipteg

Er zijn drie verschillende woorden die wat betreft ‘sluipen’ vaak worden gebruikt: sluipverkeer, sluipteg en sluipteg.

Van de Hoef en Kuijten (1979) schrijven over sluipverkeer: “Onder sluipverkeer wordt doorgaand verkeer verstaan, dat in functioneel opzicht oneigenlijk gebruik maakt van wegen van lagere orde met als doel, oponthoud, van welke aard dan ook, op de functionele route te ontgaan.”. Sluipverkeer hoeft dus volgens deze auteurs geen hinder te veroorzaken, maar een sluipteg wel: volgens deze auteurs is er sprake van een sluipteg als er zoveel sluipverkeer is dat er bijvoorbeeld capaciteitsproblemen of veiligheidsproblemen ontstaan.

Gazet van Antwerpen (2019) noemt zowel de begrippen ‘sluipteg’ als ‘sluipverkeer’. De krant schrijft: “Sluipverkeer is een verkeersstroom die het gevolg is van een capaciteitsprobleem (ongeval, file, werkzaamheden) op een belangrijke doorstromingsweg (snelweg, gewestweg)”. Ook noemt deze krant het lokale netwerk en hinder.

Gazet van Antwerpen (2019) schrijft dus dat de oorzaak van sluipverkeer een capaciteitsprobleem is.

Van de Hoef en Kuijten (1979) onderscheiden verschillende categorieën van oorzaken. Wat betreft het wegennetwerk noemen ze twee oorzaken: soms is de sluipteg altijd sneller en/of korter (dan zijn het vaak diagonalen), en soms is de sluipteg alleen sneller bij file.

Beide partijen zijn het er dus over eens dat sluipverkeer te maken heeft met het ‘uitwijken’ van verkeer van wegen van een hogere orde naar wegen van een lagere orde. Gazet van Antwerpen (2019) is niet helemaal duidelijk in de vraag of sluipverkeer altijd hinder moet veroorzaken. In deze scriptie worden Van de Hoef en Kuijten (1979) gevolgd, en hoeft sluipverkeer geen hinder te veroorzaken, maar sluiptegen wel.

Samengevat worden in deze scriptie de volgende uitgangspunten gevolgd:

- Sluipverkeer is doorgaand verkeer. Bestemmingsverkeer is dus geen sluipverkeer.
- Sluipverkeer ontstaat als de capaciteit van een weg van een hogere orde te klein is, waardoor verkeer uitwijkt naar een of meerdere wegen van een lagere orde.
- Sluipverkeer ontstaat ook als een route over wegen met een hogere orde langzamer is dan een route over wegen van een lagere orde.
- Sluipverkeer hoeft geen hinder te veroorzaken
- Als er zoveel sluipverkeer is op een weg dat dit hinder veroorzaakt, dan wordt deze weg een *sluipteg* genoemd.

Het begrip *sluipteg* wordt in deze scriptie verder niet gebruikt.

Definitie dorpskern

In dit onderzoek is het nodig om te kunnen bepalen wanneer verkeer door een dorpskern rijdt.

Hiervoor is (geo)data nodig over dorpskernen, of een thema wat hier verband mee houdt.

Er zijn geen kaarten beschikbaar over het letterlijke woord ‘dorpskern’. Wel zijn er kaarten over vergelijkbare woorden. In de volgende alinea’s zijn de datasets van de vergelijkbare woorden afgewogen.

Eerst is overwogen om data van bijvoorbeeld het CBS te gebruiken over bevolkingsdichtheid of stedelijkheid. Bij dit soort datasets is het lastig om exacte grenzen te definiëren van de dorpskernen, omdat de data bijvoorbeeld is opgebouwd met vierkanten van 100 x 100 meter, of met

gemeentegrenzen. In beide gevallen hoeven de grenzen niet overeen te komen met de grenzen van de gebieden die in dit onderzoek worden gemedend. Omdat in dit onderzoek wellicht de tijd binnen een gebied meegenomen gaat worden, is het belangrijk dat het gebied zo goed mogelijk begrensd is. Daarom vallen datasets over bijvoorbeeld bevolkingsdichtheid en adressendichtheid af.

Daarna is overwogen om de dorpskern te definiëren aan de hand van de 'kleine wegen'. In de dataset met wegvakken staat de 'Functional Road Class'. Kleine wegen hebben een groter getal, en snelwegen hebben een kleiner getal. Een mogelijke manier om de te vermijden gebieden te definiëren, is door de totale oppervlakte van 'x' meter rondom de kleine wegen te selecteren. Hierbij wordt dan aangenomen dat de gebieden rondom die kleine wegen precies de gebieden zijn die in dit onderzoek vermeden moeten worden. Het nadeel van deze aanpak is dat de afstand 'x' gedefinieerd moet worden, en niet eenduidig onderbouwd kan worden. Ook is de aanname twijfelachtig dat precies de gebieden rondom de kleine wegen vermeden moeten worden.

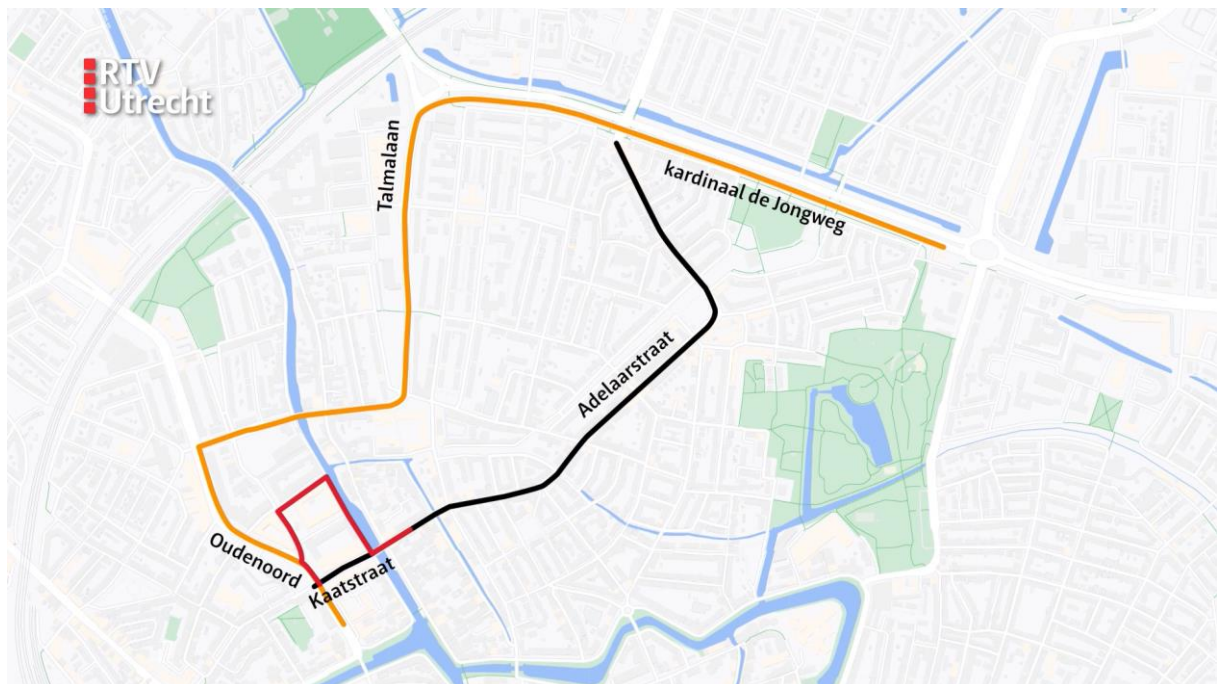
Tot slot is overwogen om de dorpskern te definiëren aan de hand van de grenzen van de 'bebouwde kom'. Het begrip 'bebouwde kom' wordt namelijk vaker gebruikt in verkeerskundige context en is heel concreet gedefinieerd: Volgens de catalogus van het Kadaster (z.d. - a) wordt de bebouwde kom omsloten door blauwe plaatsnaamborden. De definitie is dus eenduidig, en veelgebruikt. Daarom is besloten om de dorpskernen te definiëren als het gebied dat binnen de bebouwde kom valt.

2.2. Sluipverkeer in provincie Utrecht

In deze paragraaf staan drie casussen uitgewerkt van gemeenten binnen de provincie Utrecht waar volgens nieuws artikelen of onderzoeken sluipverkeer is of was. Deze casussen bewijzen dat er sprake is van sluipverkeer binnen de provincie Utrecht.

Casus gemeente Utrecht

Eind 2019 was er in gemeente Utrecht sluipverkeer in de Kaatstraat en de Adelaarstraat, richting de Kardinaal de Jongweg. (Koop, 2019). Daarom werd er een maatregel aangekondigd: een afslagverbod vanaf De Oudenoord richting de Kaatstraat, die was veranderd in een fietsstraat. In Figuur 1 is hier een plattegrond van weergegeven.



Figuur 1 Uitleg casus gemeente Utrecht. Overgenomen van video (00:32) van RTV Utrecht (2023).

In Figuur 1 zijn drie routes te zien. De zwarte route is de route over de Kaatstraat en de Adelaarstraat, waar er sprake was van sluipverkeer. De rode route toont hoe het verkeer omrijdt nu de Kaatstraat een fietsstraat is geworden. In de rode route wordt om de Kaatstraat heengereden, maar is er nog steeds sluipverkeer in de Adelaarstraat.

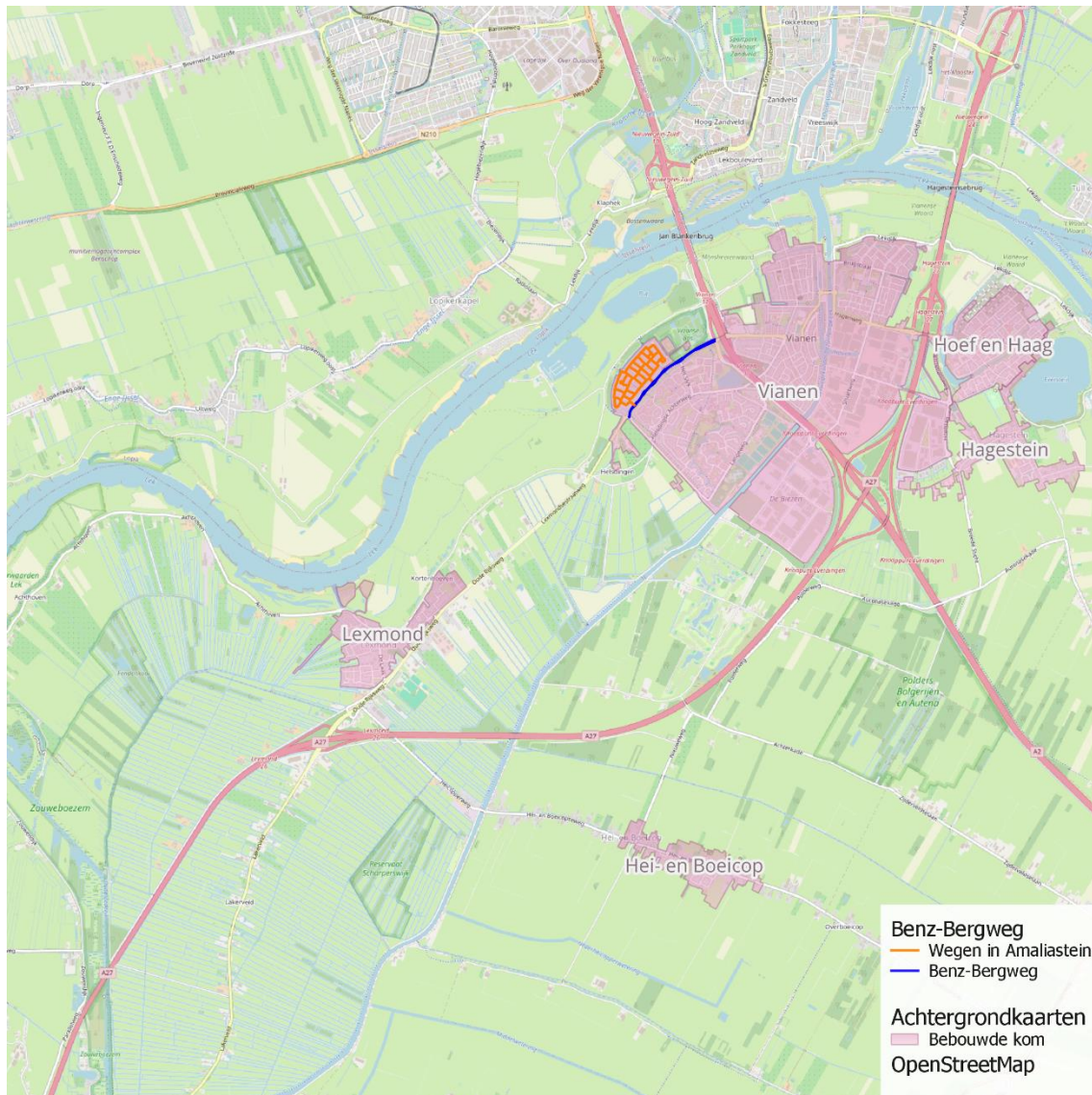
De maatregel werd aangeduid met twee verkeersborden, maar het verkeer nam net een andere route. (RTV Utrecht, 2023). De gemeente had plannen om een paaltje te plaatsen om die andere route te belemmeren, maar hier was bezwaar tegen gemaakt. (RTV Utrecht, 2023).

Casus gemeente Woudenberg

Er is onderzoek gedaan in opdracht van Gemeente Woudenberg, onder andere naar verkeer op de route Scherpenzeel-Amersfoort. (Van den Hoven, 2019). Hieruit bleek dat 8% van het verkeer uit Scherpenzeel in de ochtend, naar een bestemming moet boven de N226. 90% van dit verkeer neemt de rotonde maar 10% is sluipverkeer via onder andere de Europaweg, Stationsweg-West, Ekris en Nico Bergsteijnweg. Tussen 7:00 en 8:00 uur is dat volgens het onderzoek ook sneller dan de route langs de rotonde. Er wordt wel geschreven dat het hier om ongeveer 20 voertuigen gaat, wat volgens de onderzoekers geen significante gevolgen zou geven voor verkeersveiligheid of leefbaarheid. Aan de andere kant wordt voorspeld dat dit aantal gaat toenemen door onder andere een nieuwe wijk.

Casus gemeente Vijfheerenlanden

De gemeente Vijfheerenlanden kampt met sluipverkeer. Dit verkeer probeert in de avondspits files te vermijden door de gemeente te doorkruisen en vervolgens de oprit in Lexmond te nemen. De inwoners ervaren overlast van het sluipverkeer: ze kunnen lastig hun wijk uitrijden en moeilijk oversteken. Daarom zal er eind maart 2024 een systeem worden ingevoerd met ontheffingen. Vrachtverkeer hoeft geen ontheffing aan te vragen, onder andere omdat de sluipweg voor vrachtwagens minder tijdswinst oplevert, en er daardoor weinig overlast is van sluipverkeer door vrachtverkeer. (Vijfheerenlanden.nl, 2023). Verkeer rijdt vanaf de A2, binnendoor via Vianen en daarna langs Lexmond, naar de A27. Hierdoor ontstaat file op de Bentz-Berg in Vianen. Hier hebben de inwoners van Amaliastein en Lexmond last van, omdat zij de doorgaande weg niet op kunnen. Ter illustratie is in Figuur 2 een kaart weergegeven.



Figuur 2 De Bentz-Berg weg en omliggende wegen in Vianen en omstreken. Achtergrondkaart van OpenStreetMaps (licentieinformatie: openstreetmap.org/copyright).

in Figuur 2 is de Bentz-Berg weg blauw, en de autotoegankelijk wegen in Amaliastein zijn oranje. Het verkeer rijdt ook buiten de Benz-Berg-weg, bijvoorbeeld langs Lexmond, maar omdat de Benz-Berg weg dwars door de bebouwde kom gaat, is dit een wat hinderlijkere vorm van sluipverkeer.

In Figuur 2 is te zien dat de weg een mogelijkheid biedt om een deel van de A2 en de A27 te mijden.

Naast Lexmond, is er ook sluipverkeer dat pas in Meerkerk (dit ligt linksonder buiten de figuur) de snelweg weer opgaat. (Fröhlich, 2023).

In Vijfheerenlanden.nl (2023) wordt ook een andere plek genoemd met sluipverkeer: Lakerveld. Dit gebied lijkt geheel buiten de bebouwde kom te liggen, en valt dus niet in de scope van het onderzoek.

Tot slot schrijft Geijsman (2023) dat er in Lexmond overlast is van sluipverkeer over de dijk van Lexmond richting Ameide, van onder andere vrachtwagens. In Figuur 2 is de weg niet aangegeven, maar hij loopt vanaf Lexmond in westelijke richting.

Keuze gemeente

Er zijn drie gemeenten met sluipverkeer bekeken als potentiële locatie voor dit onderzoek. In Woudenberg bleek dat er weinig sluipverkeer was. (Van den Hoven, 2019). In gemeente Utrecht is er al een verkeersmaatregel genomen, waardoor die casus minder interessant is dan die van Vijfheerenlanden, de laatste casus die werd onderzocht. Vijfheerenlanden voldoet wel aan alle vereisten voor het beantwoorden van de hoofdvraag van dit onderzoek (aanwezigheid van sluipverkeer en mogelijkheid tot nemen van maatregelen). Vanaf volgend hoofdstuk wordt daarom alleen de gemeente Vijfheerenlanden geanalyseerd.

2.3. Vrachtverkeer

Over het algemeen zorgt vooral zwaarder sluipverkeer zoals vrachtwagens voor negatieve effecten. Zo zorgen vrachtwagens in Lexmond voor trillingen (Geijsman, 2023).

Anderzijds was te lezen dat bij de Benz-Berg-weg (de sluipweg in Vianen) weinig overlast was van vrachtwagens, omdat de tijdswinst beperkt was. In Lexmond was er dus wel sprake van overlast van vrachtwagens, maar bij de Benz-Bergweg niet.

Omdat vrachtwagens voor meer overlast zorgen dan bijvoorbeeld personenauto's, is het belangrijk om meerdere soorten verkeer te modelleren, dus niet alleen personenauto's.

2.4. Literatuur: Maatschappelijk gewenste routes

Sluipverkeer rijdt niet de gewenste route. Maatschappelijk gewenste routes zijn routes die plekken vermijden waar verkeer ongewenst is, zoals bijvoorbeeld scholen. Er zijn al diverse onderzoeken gedaan naar maatschappelijk gewenste routeplanning.

Te vermijden plekken bepalen met verkeersborden

De Mol et al. (2017) hebben een specifieke casus onderzocht, waarbij een aantal verkeersborden werden meegenomen, zoals het verkeersbord voor verpleeginrichtingen en het verkeersbord voor natuurland. Er werd onderzoek gedaan naar 'duurzame routing': dit wordt in deze scriptie 'maatschappelijk gewenste routeplanning' genoemd. Er werd een 'duurzame route' gemaakt voor een bestelwagen langs enkele afleverpunten. De onderzoekers schrijven dat veel factoren (zoals de bebouwde kom) niet werden meegenomen in hun eigen onderzoek, vanwege de specifieke casus, maar dat dit zeker wel moet gebeuren. Een van de borden die is meegenomen, is het Belgische verkeersbord A23: 'opgelet kinderen'. Er werd onderscheid gemaakt tussen binnen en buiten schooltijd: binnen schooltijden werden scholen waar mogelijk gemeden.

Er werd een kortste route gemaakt, en een route waarin bepaalde plekken werden vermeden. Bij laatstgenoemde route werden er 'strafkosten' in rekening gebracht voor gebruik van wegen langs ongewenste plekken.

In het onderzoek van De Mol et al. (2017) werden verkeersborden gebruikt om de plekken te bepalen die in het kader van duurzame routeplanning vermeden moeten worden. In deze scriptie worden hele dorpskernen vermeden, en worden de verkeersborden gebruikt om routes minder geschikt te maken voor duurzame routeplanning.

Navigatiesystemen vergelijken met SPF-routes

In een ander onderzoek (De Baets et al., 2014) worden routes van commerciële routeplanners vergeleken met een alternatieve routeplanner. Die alternatieve routeplanner implementeerde de Belgische SPF-richtlijnen, die inhouden dat een route moet beginnen op de meest lokale wegcategorie, vervolgens een steeds hogere wegcategorie, en dan weer afbouwen naar lagere categorieën totdat de bestemming bereikt is. Bij de SPF-richtlijnen wordt dus rekening gehouden met de orde van wegen, terwijl sluipverkeer volgens de definitie juist onterecht op een weg van een lage orde is. Als weggebruikers een SPF-route zouden volgen, zou hiermee dus sluipverkeer worden voorkomen.

Bij het genereren van zo'n SPF-route werd de lengte van de wegen vermenigvuldigd met een gewichtsfactor, die bepaald was met trial-and-error. De kleinste wegen kregen een wegingsfactor van

2, en de grootste hoofdwegen hielden een wegingsfactor van 1. De kleinste wegen werden dus onaantrekkelijker gemaakt, waardoor routeplannings-algoritmen routes kiezen die meer over grotere wegen gaan.

In het onderzoek werd bepaald of routes acceptabel waren aan de hand van een 'omrijfactor'. Een route is acceptabel als deze maximaal zo lang is als de reisafstand van de kortste route, vermenigvuldigd met deze factor.

Uit het onderzoek van De Baets et al. (2014) bleek dat de 'SPF-routes' in afstand gemiddeld 6,5% langer waren dan de routes van de commerciële routeplanners, maar meestal werd de omrijfactor niet overschreden. Qua tijd waren de SPF-routes ook langer, maar dat verschil was klein. Hierbij is het effect van files waarschijnlijk niet meegenomen.

Een verschil tussen deze scriptie en het onderzoek van De Baets et al. (2014) is dat De Baets et al. (2014) geen onderzoek doen naar verkeersborden. Een overeenkomst is dat in beide onderzoeken geen real-time-verkeersinformatie wordt meegenomen. De Baets et al. (2014) geven hiervoor als reden dat de meeste navigatiesystemen in België die informatie niet gebruiken.

Routekeuze & opvolging (maatschappelijk gewenste) route-adviezen

Kerkman et al. (2012) deden onderzoek naar route-adviezen, en welke factoren bepaalden in hoeverre route-adviezen werden opgevolgd. Reistijd (hier uitgesplitst in verwachte vertraging en reistijd zonder vertraging) en reiskosten bleken de belangrijkste factoren in de routekeuze. Het bleek dat het opvolgen van het route-advies afhankelijk was van het belang dat werd aangegeven. De routeadviezen werden vooral opgevolgd als er bij het route-advies stond dat het advies in het belang van het verkeersmanagement is, terwijl routeadviezen waar bij stond dat het advies in het belang van de bestuurder was, juist genegeerd werden.

Het bleek dat men bij het kiezen van een route ook de overlast voor lokale bewoners meewoog. (Kerkman et al., 2012). Een artikel van Fokkema et al. (2008) bevestigt dit: 73% van de mensen die de enquête van Fokkema et al. (2008) heeft ingevuld rijdt liever niet via bijvoorbeeld dorpskernen als dit niet nodig is, vooral om geen overlast te veroorzaken en omdat het niet prettig rijdt. De respondenten die wel via die wegen willen rijden doen dit om de file te vermijden of omdat het de snelste route is. Volgens de onderzoekers is er behoefte aan een instelling om dorpskernen en woonwijken zoveel mogelijk te vermijden.

Volgens het onderzoek van Fokkema et al. (2008) wordt doorgaand verkeer door navigatiesystemen soms over erftoegangswegen en door dorpskernen en woonwijken gestuurd, omdat de navigatieproducenten een netwerk 'sluitend' maken door wegen een hogere categorie te geven dan ze eigenlijk hebben.

De geïnterviewde vrachtwagenchauffeurs bij Fokkema et al. (2008) rijden liever niet via woonwijken of centra van dorpen en steden.

De meeste gebruikers van een navigatiesysteem (86%) gebruiken de instelling voor de snelste route (Fokkema et al, 2008). Toch hebben deze mensen niet altijd de snelste route. Soms voorspeld de navigatie bijvoorbeeld dat iets de snelste route is, maar blijkt dit toch niet de snelste route te zijn door files. Zelfs als het navigatiesysteem informatie ontvangt over de files, zal het nooit helemaal zeker kunnen zijn van de reistijd.

Ook mensen zonder navigatie hebben niet altijd de snelste route: soms denken mensen dat iets de snelste route is, maar is dit niet zo. Ook willen sommige mensen niet de snelste route, maar liever een comfortabelere route over hoofdwegen.

Veel mensen nemen dus de snelste route, maar niet iedereen.

2.5. Verkeersborden

Het onderwerp van deze scriptie is: het voorkomen van sluipverkeer met verkeersborden. Daarom wordt in deze paragraaf bepaald en onderbouwd welke verkeersborden meegenomen worden.

In Nederland hebben de verschillende verkeersborden allemaal een code, die bestaat uit een of twee letters gevolgd door een getal. De letter geeft aan in welke categorie het verkeersbord valt, bijvoorbeeld categorie A (snelheid), categorie B (voorrang), en categorie C (de gesloten-verklaringen). (verkeersbordenoverzicht.nl, 2023). Vanzelfsprekend zijn veel categorieën in dit onderzoek niet van toepassing, bijvoorbeeld borden voor bewegwijzering en waarschuwingsborden. Hieronder een opsomming van de categorieën die relevant zijn in dit onderzoek:

- Categorie A: de snelheid. Met deze borden kunnen bepaalde routes minder aantrekkelijk worden gemaakt, waardoor de wegen minder gebruikt worden. Deze categorie wordt meegenomen in dit onderzoek.
- Categorie C: de gesloten-verklaringen. Hier vallen bijvoorbeeld de borden voor eenrichtingsverkeer onder.
- Verkeersborden van categorie C kunnen het onderbord OB108 krijgen: 'uitgezonderd bestemmingsverkeer'. Door dit onderbord te gebruiken in combinatie met een bord om de weg af te sluiten, kan gezorgd worden dat alle bestemmingen bereikbaar blijven.
- Met onderborden kan een weg ook worden afgesloten om bepaalde tijden, of een andere maximumsnelheid krijgen om bepaalde tijden.

Omdat dit onderzoek over gemotoriseerd verkeer gaat, zijn alleen de verkeersborden van belang die betrekking hebben op gemotoriseerd verkeer.

Van categorie C worden daarom alleen de verkeersborden meegenomen die weergegeven zijn in Tabel 3.

Tabel 3 Verkeersborden: code, betekenis en afbeelding. De afbeeldingen zijn afkomstig uit het publieke domein.

Afbeelding(en)	Code	Betekenis
	C(0)1 C(0)6	"Verboden in te rijden" "Verboden voor motorvoertuigen op meer dan twee wielen"
	C(0)2 C(0)3	Borden om eenrichtingsverkeer aan te geven
	C(0)7	"Verboden voor vrachtauto's"

In categorie C vallen ook verkeersborden voor dimensiebeperkingen. Dit zijn lengte-, hoogte-, aslast- en gewichtsbepalingen. Er kan worden aangenomen dat die niet leiden tot een beter model, omdat met die borden allemaal ongeveer hetzelfde verkeer wordt uitgesloten, dat ook kan worden uitgesloten met verkeersbord C(0)7 ("verboden voor vrachtwagens", op te zoeken in Tabel 3). Daarom wordt er geen verkeersbord meegenomen voor dimensiebeperkingen.

Het meenemen van het verbodsbord voor vrachtwagens is een wens en geen eis in dit onderzoek, omdat vrachtverkeer ook kan worden uitgesloten met een 'normaal' verbodsbord en omdat een verbodsbord voor vrachtwagens relatief weinig gebruikt wordt.

Van de Hoef en Kuijten (1979) schrijven dat eenrichtingsverkeer niet zomaar op grote gebieden in 'het buitengebied' moet worden ingesteld, omdat dit niet verwacht wordt door weggebruikers.

Volgens datzelfde artikel is het veranderen van de maximumsnelheid geen goed idee, omdat het niet zal worden opgevolgd als het uiterlijk van de weg niet bij de maximumsnelheid past. Als in dit onderzoek maatregelen voor verandering van maximumsnelheid worden voorgesteld, dienen deze maatregelen dus samen te gaan met aanpassingen aan het uiterlijk van de weg.

2.6. Conclusies

- Sluipverkeer is doorgaand verkeer dat over een weg gaat van een lagere orde dan nodig. In deze scriptie wordt de definitie van Van De Hoef en Kuijten (1979) gebruikt. Het belangrijkste verschil met andere definities is dat er bij sluipverkeer geen sprake hoeft te zijn van overlast. Bij het gebruik van het woord 'sluipweg' moet er wel sprake zijn van overlast.
- Om te bepalen of verkeer in de dorpskern komt, wordt in dit onderzoek gebruik gemaakt van de grenzen van de bebouwde kom.
- In provincie Utrecht is er op meerdere plekken sprake (geweest) van sluipverkeer door dorpskernen: in gemeente Utrecht, gemeente Woudenberg en gemeente Vijfheerenlanden. De meest geschikte gemeente voor dit onderzoek is gemeente Vijfheerenlanden. Daarom wordt vanaf het volgende hoofdstuk alleen gekeken naar gemeente Vijfheerenlanden.
- Op sommige plekken in gemeente Vijfheerenlanden zorgen vooral de vrachtwagens voor overlast. Daarom is het belangrijk om niet alleen personenauto's te modelleren, maar ook zwaarder verkeer.
- Maatschappelijk gewenste routes genereren
 - Door bij het kiezen of genereren van een route strafkosten in rekening te brengen als de route langs ongewenste plekken zoals scholen gaat, kan een maatschappelijk gewenste route worden gegenereerd.
 - Door de lengte van kleinere wegen te vermenigvuldigen met een getal groter dan 1, worden deze wegen voor de computer langer, waardoor de computer een voorkeur krijgt voor grotere wegen. Dit is interessant, omdat sluipverkeer volgens de aangehouden definitie over een te kleine weg gaat.
- Hoe bepalen mensen hun route?
 - De belangrijkste factoren bij routekeuze zijn reistijd en reiskosten, twee begrippen die met elkaar samenhangen. In dit onderzoek wordt daarom uitgegaan van reistijd als belangrijkste factor.
 - Een deel van de mensen is bereid om een route te kiezen in het belang van verkeersmanagement of lokale bewoners.
 - Navigatiesystemen sturen mensen soms over wegen van een lagere orde dan nodig.
 - Om te bepalen of een route niet onacceptabel lang is, kan gebruik worden gemaakt van een 'omrijfactor'.
- Verkeersborden
 - In dit onderzoek worden verkeersborden meegenomen voor maximumsnelheid, eenrichtingsverkeer en wegafsluitingen. Verkeersborden met 'dimensiebeperkingen' worden niet meegenomen in dit onderzoek. Het verkeersbord 'verboden voor vrachtverkeer' is een wens en geen eis in dit onderzoek, omdat vrachtverkeer ook met een 'normaal verbodsbord', kan worden uitgesloten, en omdat verkeersborden voor vrachtverkeer relatief weinig worden gebruikt.
 - Met het onderbord 'uitgezonderd bestemmingsverkeer' kan worden gezorgd dat bestemmingen bereikbaar blijven als er borden voor eenrichtingsverkeer en wegafsluitingen worden neergezet. Ook kan met een onderbord een weg worden afgesloten om bepaalde tijden, of een andere maximumsnelheid krijgen om bepaalde tijden.

Met dit hoofdstuk is antwoord gegeven op deelvraag 1: "Wat is sluipverkeer, en waar in provincie Utrecht is het op dit moment een probleem?". Ook is antwoord gegeven op deelvraag 2: "Welke verkeersborden worden in dit onderzoek meegenomen?"

3. Dataverkenning & data-analyse

In dit hoofdstuk wordt eerst beschreven welke data beschikbaar is. Hierbij wordt bijvoorbeeld beschreven wat de geografische dekking is, en wat eventuele bijzonderheden aan de datasets zijn. Een overzicht van alle kolommen, datatypen en beschrijvingen per tabel is te vinden in Bijlage I. Na de databeschrijving worden er enkele analyses op de data uitgevoerd. Met dit hoofdstuk wordt antwoord gegeven op deelvraag 3: “Welke data is er beschikbaar om te gebruiken in dit onderzoek?”

3.1. Dataverkenning

NDW wegvakken

In deze tabel staan wegvakken. Wegvakken zijn delen van wegen en straten, meestal van kruising tot kruising. Elk wegvak heeft een id. Deze (wegvak)id's worden ook in allerlei andere datasets van de overheid gebruikt. Beschikbare datasets zijn bijvoorbeeld: hoogtebeperkingen, breedte van wegen, en maximumsnelheden.

De belangrijkste kolommen voor dit onderzoek zijn:

- Id: unieke identificatie van een wegvak
- Source, target: verwijzen naar nodes in de graaf van wegvakken.
- Frc: maat voor hoe 'belangrijk' een weg is. Hoe kleiner het getal, hoe belangrijker de weg
- Roadauthoritytype & roadauthorityname: de naam van de 'beheerder' van de weg, en of dit bijvoorbeeld een provincie of een gemeente is.
- Geom: data waarmee de weg weergegeven kan worden op een kaart

In de alinea's hieronder worden enkele van deze kolommen toegelicht.

In de wegvakkentabel is onder andere informatie te vinden over hoe belangrijk een weg is. De tabel geeft namelijk informatie over het beheerderstype (bijvoorbeeld Gemeente of Rijk) en over de Functional Road Class. De Functional Road Class is een getal tussen de 0 en de 7, waarbij het getal 0 is voor de grootste wegen (zoals snelwegen) en het getal 7 voor de kleinste wegen, die niet toegankelijk zijn voor autoverkeer.

Naast deze meer administratieve kolommen, staat er in deze tabel ook een kolom met 'geometrie'. Geometrie geeft kaartinformatie, zodat het wegvak kan worden weergegeven op een kaart. Met een geometrie kan ook worden gefilterd op locatie. Door deze geometrie-kolom te gebruiken én de geometrie van provincie Utrecht, kunnen bijvoorbeeld alle wegvakken binnen de provincie Utrecht worden geselecteerd.

Wegen met tweerichtingsverkeer, en wegen waar de rijbanen elkaar raken, staan in de 'originele' tabel weergegeven als één rij, met rijrichting 'beide'. In de tabel van Analyse zijn er twee rijen van gemaakt, en is er een minteken voor het id gezet. Ook sommige wegen die maar een keer in de tabel voorkomen hebben een minteken voor het id gekregen.

Floating Car Data

Floating Car Data bestaat uit gegevens van voertuigen die elk vast tijdsinterval een meting doen. Hierbij wordt het voertuigtype, het tijdstip, de locatie en de snelheid geregistreerd. Voor dit onderzoek is Floating Car Data aangereikt van binnen provincie Utrecht, van de periode van maandag 4 september 2023 tot en met zaterdag 9 september 2023.

De belangrijkste kolommen voor dit onderzoek zijn:

- Session_id: identificatie van een voertuig. Elk voertuig krijgt elke datum een ander session_id
- Timestamp: tijdstip waarop de meting is gedaan, tot op de seconde nauwkeurig

- **Vehicle_type:** hier zijn 6 opties voor: Bus, car, truck, lcv (in het Nederlands is dat een bestelbusje), unknown en other.
- **Speed:** de snelheid van het voertuig tijdens de meting
- **Gme_id:** maakt het mogelijk om te filteren op gemeente
- **Wvk_id:** verwijzing naar de wegvakken in de NDW-wegvakkentabel. Het wegvak waar een meting aan gekoppeld is, is bepaald door Analyze op basis van de locatie van de meting.
- **Geom:** data waarmee een weg weergegeven kan worden op een kaart

Elke meting bevat dus een `session_id`. Dit is een tekst waarmee verschillende metingen aan hetzelfde voertuig gekoppeld kunnen worden. Rond middernacht worden de `session_ids` gereset, dus een voertuig kan nooit meer dan 24 uur worden gevolgd.

Het interval tussen de datapunten is niet steeds gelijk: de meeste voertuigen doen elke 3 seconde of elke 10 seconde een meting. Soms zit er veel meer tijd tussen de tijdstempels: in dat geval zijn er twee opties:

- Het voertuig bevindt zich buiten de provincie, waardoor de metingen niet in de gegeven data zitten
- Het voertuig is niet aan het rijden. De `session_ids` worden om middernacht gereset, dus als iemand 's ochtends naar het werk gaat en 's avonds naar huis gaat, dan heeft diegene hetzelfde `session_id`. Op deze situatie wordt dieper ingegaan in de volgende paragraaf.

De voertuigtypen in de dataset zijn 'truck', 'car', 'unknown', 'other', 'bus', en 'lcv'. Lcv staat voor 'light commercial vehicle', in het Nederlands is dit een bestelbusje. Doordat in deze dataset alleen bedrijfsvoertuigen zijn meegenomen, is er een oververtegenwoordiging van vrachtauto's en bestelbusjes. Om voor deze oververtegenwoordiging te corrigeren, en ook om te corrigeren voor het feit dat niet elk voertuig in de Floating Car Data zit, wordt in dit onderzoek de Floating Car Data gewogen met `lvsdata`. Hoe er wordt bepaald welke meetlussen worden meegenomen, en hoe de wegingsfactoren worden bepaald, is te vinden in Bijlage II.

Doordat in de Floating Car Data niet alleen personenauto's zijn opgenomen, maar ook lcv's en trucks, kan in dit onderzoek ook zwaarder verkeer worden gemodelleerd. Zo wordt voldaan aan het uitgangspunt uit hoofdstuk 2 dat niet alleen personenauto's moeten worden gemodelleerd.

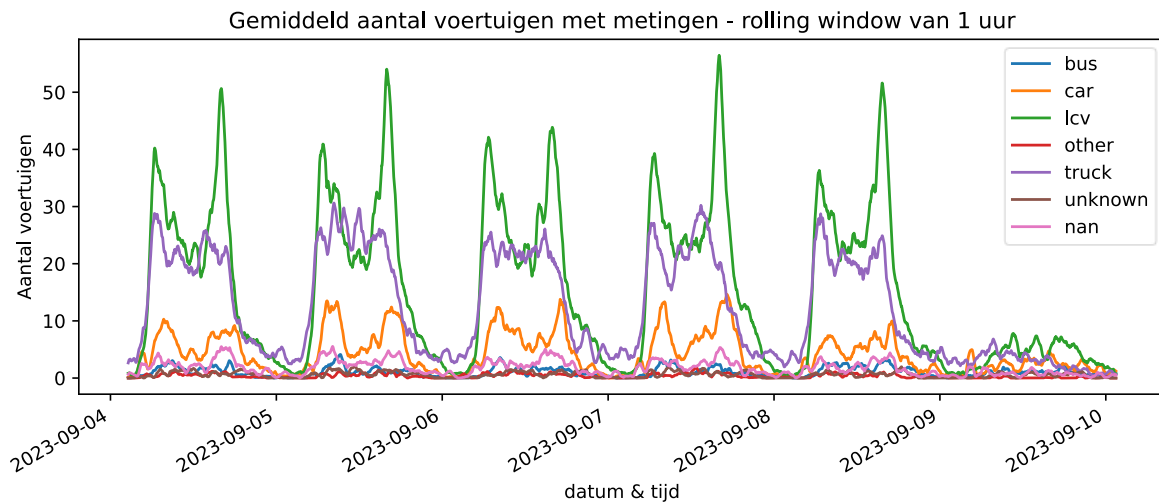
Het bedrijf achter de data heeft met de locatie de snelheidslimiet van de weg, en een 'categorie' van de weg bepaald. Dit bedrijf heeft het bijbehorende `wegvak_id` niet meegegeven. Dit `wegvak_ids` is door Analyze bepaald aan de hand van de coördinaten van de metingen.

3.2. Data-analyse

Tijdstip

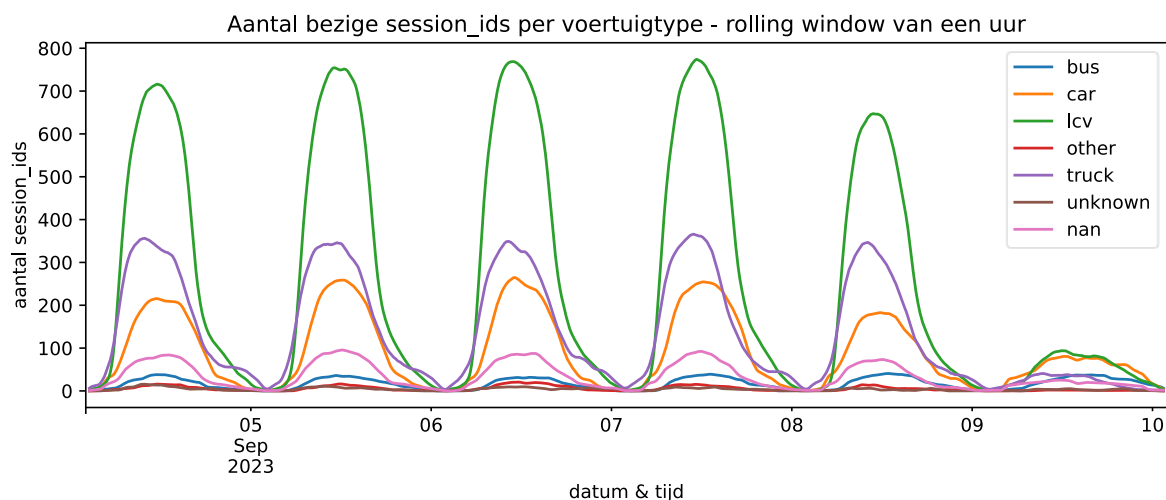
Bij alle lijngrafieken in deze paragraaf is 2 uur opgeteld bij de tijdstippen, om te corrigeren voor de tijdzones. De tijdstempels zijn namelijk gegeven in UTC, terwijl in Nederland in september UTC + 2 geldt.

In Figuur 3 is het gemiddelde aantal voertuigen te zien, dat in een minuut minstens 1 meting heeft gedaan. Deze grafiek is uitgesplitst naar voertuigtype. Deze grafiek is gemaakt met de Floating Car Data.



Figuur 3 Aantal metingen per minuut – rolling window van een uur. Hierbij is lcv de Engelse benaming voor ‘bestelbusje’.

In Figuur 4 is ook een uitsplitsing te zien per voertuigtype, maar hierbij is alleen gekeken naar de eerste- en de laatste meting van elk session_id. Dit is belangrijk, omdat de eerste meting de herkomst van een reis zou moeten zijn, en de laatste meting de bestemming.

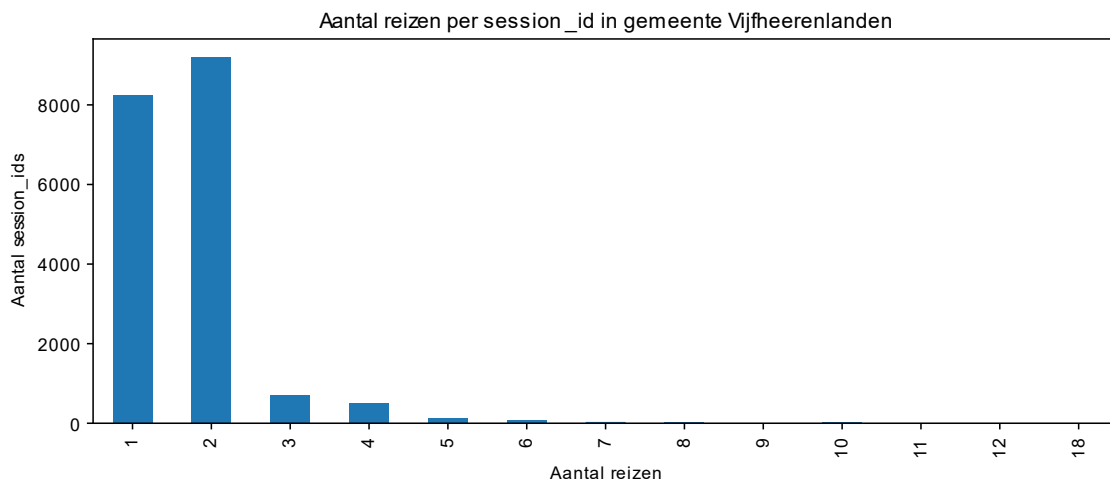


Figuur 4 Aantal voertuigen waarbij het tijdstip tussen de eerste en de laatste meting van de session_id zit. Hierbij is lcv de Engelse benaming voor ‘bestelbusje’. In deze figuur zijn zes dagen weergegeven, 4 september 2023 viel dus op maandag.

In Figuur 4 is iets opmerkelijks te zien: het patroon komt niet overeen met het patroon in Figuur 3. Dit komt doordat de session_ids langer door blijken te lopen dan de reizen: voertuigen houden op dezelfde datum hetzelfde session_id, ook als ze meerdere reizen hebben. Als een voertuig bijvoorbeeld ‘s ochtends naar het werk gaat en ‘s middags naar huis, houdt dit voertuig hetzelfde session_id. Daarom moeten session_ids worden uitgesplitst in meerdere reizen. Er is besloten om uit te splitsen als een voertuig meer dan 20 minuten geen meting heeft in het betreffende gebied. Er is gekozen voor 20 minuten, omdat 20 minuten een logische termijn is om te splitsen: als een voertuig enkele minuten geen gegevens heeft verstuurd, kan dit bijvoorbeeld een tussenstop zijn om te tanken. Bij 20 minuten kan worden aangenomen dat er echt meerdere reizen plaatsgevonden hebben.

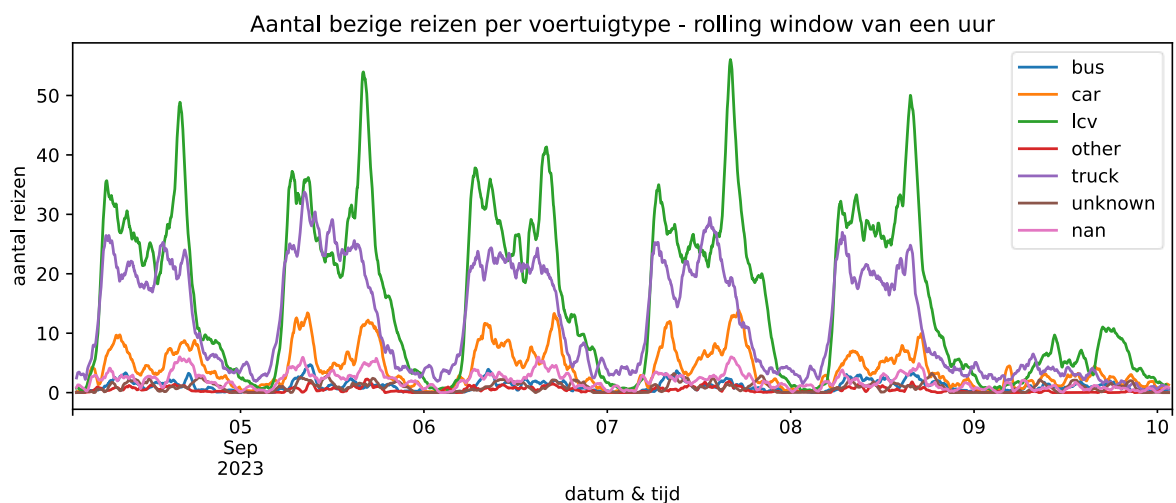
Op die manier ontstaan er uit een session_id meestal een of twee reizen, zoals te zien is in Figuur 5.

In Figuur 5 is het aantal reizen per session_id weergegeven.



Figuur 5 Aantal reizen per session_id

Als de session_ids op die manier worden uitgesplitst, en vervolgens wordt er weer een grafiek gemaakt zoals Figuur 4, dan ontstaat Figuur 6.



Figuur 6 Aantal voertuigen waarbij het tijdstip tussen de eerste en de laatste meting van de reis zit. Hierbij is lcv de Engelse benaming voor 'bestelbusje'. In deze figuur zijn zes dagen weergegeven, 4 september 2023 viel dus op maandag.

In Figuur 6 komt het patroon overeen met het patroon uit Figuur 3. Hieruit blijkt dat het uitsplitsen van de session_ids in verschillende reis_ids nodig is.

Uit de figuren zijn verder de volgende conclusies te trekken wat betreft tijdstippen:

- Uit Figuur 4 blijkt dat er op vrijdag (8 september) minder voertuigen op de weg zijn, en op zaterdag (9 september) nog minder.
- Uit Figuur 4 blijkt dat de voertuigtypen allemaal net een ander patroon hebben: de auto's zijn tot iets later op de weg dan de vrachtwagens.
- De zondag ontbreekt in de data.
- Er geen 'spitspatroon' aanwezig in Figuur 4, maar wel in Figuur 3 en Figuur 6. Dit komt doordat de session_ids niet veranderen als de reis stopt.
- Uit Figuur 6 blijkt dat er in gemeente Vijfheerenlanden twee drukke momenten zijn: dit zijn de ochtendspits en de avondspits. In dit onderzoek worden daarom ook zowel de ochtend- als de avondspits meegenomen.

Voertuigtypen

Ook wat betreft voertuigtypen zijn er uit de grafieken wat conclusies te trekken:

- In Figuur 4, en dus in de dataset, zijn er veel meer metingen van lcv's (Light Commercial Vehicles, in het Nederlands: bestelbusjes) dan van auto's. Daaruit blijkt de noodzaak van het wegeen van de data.
- Er zijn veel minder reizen in de Floating Car Data van de voertuigtypen 'other', 'unknown' en 'bus'.
- De voertuigen hebben niet allemaal hetzelfde patroon, zo hebben vooral de lcv's (bestelbusjes) een grote piek bij de avondspits.

3.3. Conclusies

- Er is data beschikbaar over wegkenmerken en over reisbewegingen.
- De vervoersvraag hangt onder andere af van het tijdstip. In dit onderzoek worden alleen de twee drukste momenten van werkdagen meegenomen: de ochtendspits en de avondspits.
- In de Floating Car Data houdt een voertuig de hele dag hetzelfde session_id, ook als het voertuig meerdere reizen maakt. Daarom moeten de session_ids worden uitgesplitst in verschillende reizen. Er moet een uitsplitsing plaatsvinden als de tijdsperiode tussen twee opeenvolgende metingen van dezelfde session_id langer is dan 20 minuten.
- Door gebruik te maken van de Floating Car Data wordt gezorgd dat meerdere soorten verkeer worden gemodelleerd, dus niet alleen personenauto's.
- De Floating Car Data moet gewogen worden met de lusdata, omdat bepaalde categorieën voertuigen oververtegenwoordigd zijn in de Floating Car Data, en omdat niet elk voertuig in de Floating Car Data zit.
- Er zijn veel minder reizen in de Floating Car Data van de voertuigtypen 'other', 'unknown' en 'bus'.

Met deze conclusies is antwoord gegeven op deelvraag 3: "Welke data is er beschikbaar om te gebruiken in dit onderzoek?"

4. Wiskundige modellen

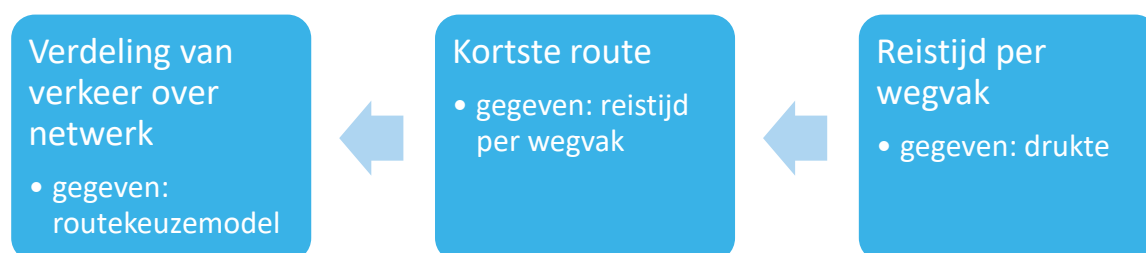
In dit hoofdstuk staat informatie over wiskundige modellen die kunnen worden toegepast in dit onderzoek.

Het hoofdstuk bestaat uit twee paragrafen. In de eerste paragraaf wordt toegewerkt naar een model dat verkeer op een realistische manier kan verdelen over een gegeven netwerk. In de tweede paragraaf staan modellen die 'optimale verkeersmaatregelen' in een verkeersnetwerk bepalen.

Met dit hoofdstuk wordt antwoord gegeven op deelvraag 4: "Welke methodieken worden in de literatuur gebruikt om de maatregelen te plannen die horen bij de verkeersborden in deelvraag 2?"

4.1. Verkeerstoedeling over een netwerk

In deze paragraaf worden verschillende algoritmen besproken. Elke subparagraaf bespreekt een 'laag'. Deze 'gelaagdheid' is weergegeven in Figuur 7.



Figuur 7 Lagen van algoritmes in verkeersmodellen

In Figuur 7 is bijvoorbeeld te zien dat kortste-route-algoritmes een algoritme voor de reistijd per wegvak gebruiken. Er worden in deze paragraaf dus drie stappen beschreven: het berekenen van de reistijd op een wegvak, het bepalen van de kortste route en het berekenen van de verdeling van verkeer over een netwerk.

Reistijd van een wegvak

In hoofdstuk 2 is geconcludeerd dat reistijd een belangrijke factor is in de routekeuze, en dat sluipverkeer kan ontstaan doordat de sluipweg een kortere reistijd heeft. Reistijd is dus een belangrijke factor in dit onderzoek. Daarom moet vastgelegd worden hoe de reistijd op een weg berekend kan worden. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het aantal voertuigen op een weg, want een drukke weg heeft een langere reistijd.

Ma et al. (2018) noemen twee mogelijke functies voor de reistijd.

De eerste functie is een lineaire formule, die Ma et al. (2018) overgenomen hebben van Zhou et al. (2016):

$$t_a = \alpha_a + \beta_a x_a, \quad \forall a$$

Hierin staat x_a voor de intensiteit (het aantal voertuigen) op link a , en de andere tekens zijn parameters. Die parameters kunnen afhankelijk zijn van bijvoorbeeld de maximumsnelheid.

De andere functie die Ma et al. (2018) beschrijven is de Bureau of Public Road functie (BPR-functie), die Ma et al. (2018) overgenomen hebben van Li et al. (2013):

$$t_a = t_{a,0} \left[1 + \gamma_a \left(\frac{x_a}{\zeta_a} \right)^{\eta_a} \right], \quad \forall a$$

Ook in deze formule staat x_a voor de intensiteit op link a . $t_{a,0}$ is de reistijd bij 'freeflow': een situatie waarin er geen verkeer is, of zo weinig verkeer dat de snelheid er niet door wordt beïnvloed. ζ_a is de capaciteit van link a , en de andere tekens zijn volgens Ma et al. (2018) parameters.

Deze auteurs gebruiken in hun voorbeeldnetwerk 0.15 voor gamma en 4 voor eta. Bunschoten & Kwant (2021) schrijven dat gamma standaard 4 is, en dat eta zorgt voor de mate waarin de reistijd

toeneemt bij het naderen van de capaciteit van een weg. Deze auteurs geven een waarde voor η per wegtype, bijvoorbeeld 'erftoegangswegen' of 'auto(snel)wegen'.

Merk op dat de eerste vergelijking de capaciteit van een weg niet nodig heeft, en de tweede vergelijking wel. Toch wordt de tweede vergelijking volgens Ma et al. (2018) vaak gebruikt bij routekeuzemodellen. Daarom wordt ook in deze scriptie de BPR-functie gebruikt.

Routekeuze: kortste route bepalen (gegeven de reistijden)

In hoofdstuk 2 is geconcludeerd dat reistijd een belangrijke factor is in de routekeuze. Reizigers nemen meestal de snelste route. Daarom is er in dit onderzoek een algoritme nodig dat, gegeven een wegennetwerk, bepaald wat de route is met de kortste reistijd tussen een beginpunt en een eindpunt. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van de berekende reistijden per wegvak uit de vorige subparagraaf.

Om een kortste route te genereren in een netwerk, worden in de gelezen artikelen verschillende algoritmen gebruikt.

- Baskan & Ozan (2018) lichten niet toe hoe zij de kortste route berekenen.
- De Mol et al. (2017) en De Baets et al. (2014) gebruiken het Dijkstra-algoritme, of een variant daarvan.
- Shanmugasundaram et al. (2019) gebruiken breadth-first-search' (BFS). Breadth-first-search is een algoritme dat doet denken aan het Dijkstra-algoritme, maar in het Dijkstra-algoritme kunnen gewichten van wegen worden meegenomen, en in BFS niet. (Champion, z.d.). Daarom is het Dijkstra-algoritme geschikter dan breadth-first-search voor dit onderzoek.
- Drezner & Salhi (2002) gebruiken voor het berekenen van de lengte van alle kortste paden, gegeven een netwerk, de methode uit het artikel van Drezner & Wesolowsky (1997). Dit is een simpele, iteratieve methode, die in een keer de kortste paden tussen alle herkomsten en bestemmingen berekend.

Zowel het Dijkstra-algoritme als het algoritme dat Drezner & Wesolowsky gebruiken hebben voordelen voor dit onderzoek: het Dijkstra-algoritme is al bekend binnen Analyse en het algoritme van Drezner & Wesolowsky (1997) berekend in één keer alle kortste paden. In dit onderzoek wordt het Dijkstra-algoritme gebruikt, omdat het Dijkstra-algoritme bekender is dan het algoritme van Drezner & Wesolowsky gebruikten, en omdat er binnen het bedrijf al code geschreven is voor het Dijkstra-algoritme.

Verkeer verdelen over netwerk (gegeven het routekeuze-model)

Er zijn nu twee algoritmen gekozen. Het ene algoritme kan de reistijd bepalen op een weg, gegeven de drukte op die weg. Het andere algoritme kan een kortste route genereren, gegeven een wegennetwerk en reistijden.

Er is nog één algoritme nodig in dit onderzoek, namelijk een algoritme dat verkeer verdeelt over het netwerk. Die toedelingsalgoritmes gebruiken vaak formules voor reistijd en formules voor de kortste route.

Bij het modelleren van routekeuze wordt, bijvoorbeeld door Ma et al. (2018) aangenomen dat alle reizigers de kortste route willen. Dit is te rijmen met de conclusie uit hoofdstuk 2.

Er zijn verschillende manieren om verkeer te verdelen over een netwerk. Sommige van deze modellen zijn 'stochastisch', dat wil zeggen dat ze rekening houden met een bepaalde variatie in de keuze van mensen. Hiermee kan bijvoorbeeld gemodelleerd worden dat niet iedereen kennis heeft van alle routes en de bijbehorende reistijden. Dit onderzoek gaat over sluipverkeer. Sluipverkeer is juist wél op de hoogte van alle routes, en wellicht ook van de reistijden. Daarom wordt in deze scriptie geen stochastische toedeling gemaakt.

De simpelste toedeling is de alles-of-niets-toedeling, waarbij iedereen de kortste route neemt, op basis van de reistijd in 'free-flow'. Dit model houdt dus geen rekening met verandering in routekeuze door drukte. Daarom is dit model ongeschikt voor dit onderzoek: bij sluipverkeer neemt verkeer soms juist een omweg omdat de 'normale' route file (en dus geen free-flow) heeft.

Daarom wordt in dit onderzoek de gebruikersevenwichts-toedeling gebruikt, zoals bijvoorbeeld Baskan & Ozan (2018) doen. Gebruikersevenwicht wordt soms afgekort tot UE (User Equilibrium). In een gebruikersevenwichts-toedeling kan niemand zijn reistijd verkleinen door een andere route te kiezen.

Uit de Braess Paradox (die wordt uitgelegd in de volgende paragraaf) blijkt dat het gebruikersevenwicht niet altijd de situatie is met de kleinste totale reistijd.

Om het verkeer volgens de gebruikersevenwichts-toedeling te verdelen over meerdere routes, kan het volgende algemene stappenplan worden gebruikt. Dit is aangepast overgenomen van Van Nes (2013).

1. Initialisatie: elk wegvak heeft 0 voertuigen
2. Bepaal op basis van de huidige voertuigen per wegvak, de kosten (bijvoorbeeld reistijd) per wegvak
3. Verdeel verkeer, bijvoorbeeld met de alles-Of-niets toedeling.
4. Bepaal nieuwe waarden voor het aantal voertuigen per wegvak
5. Ga terug naar stap 2.

Stap 4 kan op verschillende manieren. Van Nes (2013) gebruikt Frank-Wolfe en MSA, waarbij MSA een specifieke en relatief simpele manier is van het Franke-Wolfe-algoritme. (Van Nes, 2013). MSA kan omgaan met meerdere herkomsten en bestemmingen (Van Nes, 2013). Daarom wordt in dit onderzoek MSA gebruikt.

4.2. Wegennet optimaliseren

Met de theorie van bovenstaande paragraaf kan verkeer, gegeven een netwerk en herkomsten- en bestemmingen, op een realistische manier worden verdeeld over het netwerk.

Vervolgens is, vanwege de hoofdvraag van deze scriptie, de volgende vraag van belang: hoe kan het wegennetwerk, met verkeersborden, zo worden aangepast dat sluipverkeer wordt voorkomen?

In hoofdstuk 2 zijn maatregelen naar voren gekomen die met verkeersborden kunnen worden uitgevoerd: het veranderen van de maximumsnelheid, het instellen van eenrichtingsverkeer en het afsluiten van wegen. Elke subparagraaf in deze paragraaf gaat over artikelen over een van die verkeersmaatregelen. Deze artikelen maken gebruik van informatie uit paragraaf 1, bijvoorbeeld voor het berekenen van de reistijden of voor het bepalen van de uitgangssituatie.

De paragraaf begint met een algemene inleiding van begrippen in de literatuur.

Road Network Design Problem

In een artikel van Farahani et al. (2013) wordt een overzicht gegeven van studies naar onder andere het RNDP: het Road Network Design Problem. In deze studie staat dat het RNDP kan worden uitgesplitst door te kijken naar het soort beslissingen: Het Discrete Network Design Problem gaat over beslissingen met gehele getallen, zoals het aantal banen dat toegevoegd wordt op een weg en de richting van eenrichtingsverkeer. Het Continuous Network Design Problem (CNDP) gaat over continue beslissingsvariabelen (bijvoorbeeld hoeveel tol er wordt gevraagd voor een straat), en Mixed Network Design Problem (MNDP) gaat over allebei.

Volgens het artikel van Farahani et al. (2013) wordt het RNDP vaak geformuleerd in twee lagen. De bovenste laag is de laag van bijvoorbeeld de politiek: degene die het netwerk ontwerpt. Dit wordt ook wel de leider genoemd. Er wordt aangenomen dat de leider het gedrag van de reizigers kan

voorspellen. De onderste laag is het probleem van de reizigers: de 'volgers'. Als de volgers weten wat de leider heeft besloten, dan kunnen ze hun keuze maken.

In dit onderzoek is er ook een soort leider-volgersysteem: de leider (de wegbeheerder of het model) bepaald hoe de weg is ingericht, en de volgers (de voertuigen) bepalen hun routes, gegeven het verkeersnetwerk van de leider. In dit onderzoek kan dus ook een tweelaags model of een tweelaagse manier van denken gebruikt worden.

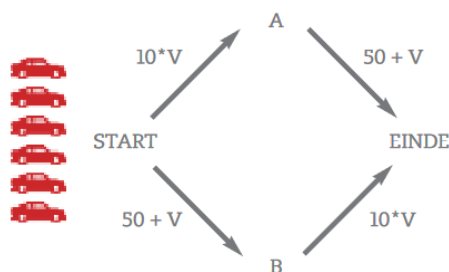
Wegen sluiten

Eén van de maatregelen die met verkeersborden kan worden gedaan, is het afsluiten van wegen. Het selecteren van wegen die het beste kunnen worden afgesloten valt onder het DNDP.

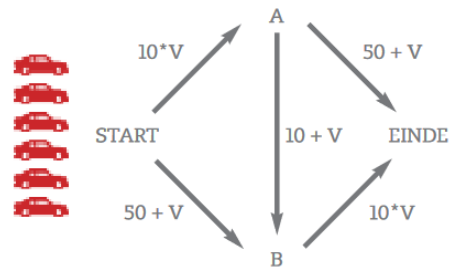
Braess-paradox

Veel artikelen over het sluiten van wegen verwijzen naar de Braess-paradox. Door dit bekende verschijnsel is het mogelijk dat het aanleggen van een weg leidt tot een langere reistijd voor alle reizigers (Bliemer, 2007).

In Smeets (2014) wordt de Braess-paradox duidelijk uitgelegd. Het getallenvoorbeeld hieronder, inclusief Figuur 9 en Figuur 8, is afkomstig van Smeets (2014).



Figuur 9 Braess-paradox - oude situatie. Overgenomen van Smeets (2014)



Figuur 8 Braess-paradox - nieuwe situatie. Overgenomen van Smeets (2014).

Zowel in Figuur 8 als in Figuur 9 is de reistijd van de wegvakken te berekenen met de formule die bij de wegvakken staat, door bij 'V' het aantal voertuigen in te vullen.

In de oude situatie (Figuur 9) zal de ene helft van de 6 auto's via A rijden, en andere de helft via B. Alle auto's hebben nu een reistijd van 83 minuten. Als er een nieuwe weg wordt aangelegd tussen A en B ontstaat de nieuwe situatie (Figuur 8).

Het verkeer zal zich als volgt aanpassen aan de nieuwe situatie:

- 1) 1 voertuig dat eerst route A nam, neemt de nieuwe route langs A én B. Dit voertuig heeft nu een kortere reistijd (81 minuten), maar de voertuigen op de onderste route hebben nu een reistijd van 93 minuten.
- 2) 1 voertuig dat eerst route B nam, neemt nu ook de nieuwe route langs A én B. Hierdoor is er een nieuwe evenwichtssituatie ontstaan waarin ieder voertuig een reistijd heeft van 92 minuten.

In dit voorbeeld wordt de Braess-paradox duidelijk: doordat elk individu zijn reistijd minimaliseert, ontstaat er een suboptimale situatie.

Vanwege de Braess-paradox is het wellicht mogelijk om voor alle reizigers tot een betere situatie te komen door wegen af te sluiten. Het gebruikersevenwicht zou dan dichterbij het systeemoptimum komen te liggen: een situatie waarin de opgetelde reistijd van alle verkeersdeelnemers minimaal is (Amini et al., 2022).

Bliemer (2007) wijst erop dat de vervoersvraag niet altijd hetzelfde is, waardoor het afsluiten van een weg bij een grote vervoersvraag leidt tot een betere situatie (vanwege de Braess-paradox), terwijl bij een kleinere vervoersvraag de weg juist niet gesloten zou moeten worden.

In dit onderzoek is het doel van het sluiten van de wegen niet het verlagen van de totale reistijd, maar het voorkomen van sluipverkeer in dorpskernen. Het voorkomen van sluipverkeer mag in dit onderzoek zelfs leiden tot een wat grotere totale reistijd. Toch wordt in het vervolg van dit onderzoek literatuur gebruikt die uitgaat van de Braess-paradox, omdat de modellen uit deze literatuur na aanpassing wellicht bruikbaar zijn in deze scriptie.

Selecteren van wegen om af te sluiten

Een van de artikelen over de Braess paradox en het afsluiten van wegen is dat van Ma et al. (2018). Deze auteurs berekenen in de eerste stap welke links (wegvakken) de Braess-paradox zouden kunnen veroorzaken, en in de tweede stap bij welke vervoersvraag dat gebeurt.

In de eerste stap wordt een optimalisatie-probleem geformuleerd, waarin wordt gezocht naar de wegvakken waarvan het sluiten leidt tot de grootste vermindering van totale reistijd in het netwerk. Deze auteurs maken eerst een mixed-integer nonlinear program (MINLP). Vervolgens wordt dat model herschreven in een tweelaags model voor het Discrete Network Design Problem (DNDP). Omdat er veel wijzigingen in het netwerk mogelijk zijn, wordt er een methode toegepast die een ondergrens voor de totale reistijd kan berekenen. Deze ondergrens wordt berekend met het systeemoptimum (dus niet met het gebruikersevenwicht).

In de tweede stap wordt de vervoersvraag berekend waarbij de Braess-paradox daadwerkelijk optreedt.

Volgens de auteurs werkt de aanpak ook in complexere netwerken met meerdere Herkomst-Bestemmings-relaties. Wel geven de auteurs aan dat de berekening in de tweede stap niet altijd mogelijk is, dit heeft te maken met een parameter in de BPR-functie.

Amini et al. (2022) zijn ingegaan op Ma et al. (2018). Volgens Amini et al. (2022) is de rekentijd van het algoritme van Ma et al. (2018) aanzienlijk, en hebben de laatstgenoemde auteurs onterecht de aanname gedaan dat er minimaal twee links veranderd moeten worden ten opzichte van het originele netwerk.

In het artikel van Ma et al. (2018) staan concrete voorbeelden uitgewerkt, dit is een voordeel ten opzichte van het artikel van Amini et al. (2022) voor gebruik in dit onderzoek. Ook zijn de tussenstappen van de berekeningen in het eerstgenoemde artikel het duidelijkst weergegeven. In het vervolg van dit onderzoek wordt daarom het artikel van Ma et al. (2018) gebruikt. In dat artikel worden toedelingen gemaakt volgens zowel het systeemoptimum als het gebruikersevenwicht.

Alleen bestemmingsverkeer

Over het plaatsen van het onderbord 'alleen bestemmingsverkeer' is in de literatuur weinig gevonden. Er wordt bij het plannen van routes soms wel rekening mee gehouden. Zo werd in het artikel van De Mol et al. (2017), dat al aan bod kwam in paragraaf 2.4 over maatschappelijk gewenste routeplanning, een soort uitzondering gemaakt: de route moet de schoolzone mijden, tenzij dit niet mogelijk is omdat het afleverpunt in of vlakbij een schoolzone ligt. Dit kan worden gezien als een manier om om te gaan met bestemmingsverkeer.

In dit onderzoek moet worden gezorgd dat alle herkomsten en bestemmingen bereikbaar blijven. Als een herkomst of een bestemming onbereikbaar wordt door een verbodsbord, moet het onderbord 'uitgezonderd bestemmingsverkeer' worden geplaatst.

Eenrichtingsverkeer

Met verkeersborden kan ook eenrichtingsverkeer worden ingesteld. Hierdoor moet het verkeer dat de 'andere kant' op wil een omweg nemen, waardoor dit verkeer een langere reistijd heeft en dus

wellicht afziet van het sluipen. Een andere mogelijkheid is om juist een weg met eenrichtingsverkeer te veranderen in tweerichtingsverkeer, waardoor de weg smaller wordt. (Rottiers et al., 2007). Die laatste maatregel wordt niet meegenomen in dit onderzoek.

Er zijn twee onderzoeksvragen over het instellen van eenrichtingsverkeer die in de literatuur worden onderzocht:

1. Bepaal, gegeven een ongerichte graaf, in welke richting het eenrichtingsverkeer moet lopen. In dit geval worden dus alle wegen eenrichtingsverkeer. Deze vraag wordt onder andere onderzocht door Shanmugasundaram (2019).
2. Bepaal, gegeven een graaf waarin overal tweerichtingsverkeer is, welke wegen beter eenrichtingsverkeer kunnen worden. Deze vraag wordt onder andere onderzocht door Baskan & Ozan (2018) en Drezner en Salhi (2002).

De situatie van de eerste vraag is veel minder relevant dan de situatie van de tweede vraag. Daarom wordt in deze paragraaf verder alleen stilgestaan bij de tweede situatie.

Sommige onderzoekers (Başkan & Ozan, 2018; Drezner & Salhi, 2002) nemen aan dat de snelheid van een straat met tweerichtingsverkeer langzamer is dan de snelheid van een straat met eenrichtingsverkeer. Dit heeft wellicht te maken met de passeerbewegingen: hierdoor gaat de snelheid omlaag.

Het doel van die onderzoeken is om het wegennet beter in te richten, door op sommige wegen eenrichtingsverkeer in te stellen. In één richting zou het verkeer dan sneller kunnen rijden, wat opweegt tegen het feit dat het verkeer in tegengestelde richting om zal moeten rijden.

Overigens is het doel van deze scriptie niet om verkeer beter te laten doorstromen in 1 richting. Eerder om verkeer te hinderen in de andere richting. Wellicht zorgt het instellen van eenrichtingsverkeer juist voor een vermeerdering van het sluipverkeer.

Als een weg een gescheiden rijbaan heeft, kan deze gemodelleerd worden als twee wegen met eenrichtingsverkeer. Het instellen van eenrichtingsverkeer kan dan worden gemodelleerd door een van die twee wegen af te sluiten.

Als een weg een gemengde rijbaan heeft, kan het instellen van eenrichtingsverkeer op dezelfde manier worden gemodelleerd, alleen wordt dan wel voorbijgegaan aan het feit dat de drukte in de ene richting van de weg, de capaciteit in de andere richting beïnvloed. Wegen met gemengde rijbanen zijn meestal kleine wegen, zoals in woonwijken. De wegen met sluipverkeer zullen waarschijnlijk niet deze kleinste wegen zijn. Daarom is het effect van deze aanname klein. Kortom: In de meeste gevallen kan het instellen van eenrichtingsverkeer worden gemodelleerd met een model voor het afsluiten van wegen. Daarom wordt in dit onderzoek geen model meegenomen voor het instellen van eenrichtingsverkeer.

Maximumsnelheid

De laatste maatregel die mogelijk is met de gekozen verkeersborden uit hoofdstuk 2 is het veranderen van de maximumsnelheid.

In de alinea's hierboven is al geschreven over een vergroting van de snelheid in één richting bij het instellen van eenrichtingsverkeer. Dit gaat niet over de maximumsnelheid, maar meer over de snelheid die in de praktijk wordt gereden.

Een maatregel die wél met de maximumsnelheid te maken heeft is het verlagen van de maximumsnelheid op een weg die vaak een sluipweg is. Door deze maatregel wordt de reistijd groter, waardoor de weg minder aantrekkelijk wordt. Ook verkeersmodellen kiezen minder snel voor een route met een lange reistijd.

Om te bepalen welke wegen onaantrekkelijker gemaakt kunnen worden, zou dan gekeken kunnen worden naar het verschil tussen een optimale situatie (bijvoorbeeld het systeemoptimum) en de huidige situatie (het gebruikersevenwicht). Wegen die in de optimale situatie veel minder gebruikt

worden dan in de huidige situatie, zijn waarschijnlijk wegvakken die 'ontmoedigd' zouden kunnen worden.

Het vergroten van de maximumsnelheid op gewenste routes is geen optie in dit onderzoek, omdat wegen niet zijn ingericht op hogere snelheden, en daardoor onveiliger zouden worden.

4.3. Conclusies

- Bij het bepalen van de reistijd wordt in dit onderzoek de BPR-functie gebruikt.
- In dit onderzoek zijn zowel het Dijkstra-algoritme als het algoritme van Drezner & Wesolowsky mogelijke algoritmen om de kortste route te bepalen. In dit onderzoek wordt het Dijkstra-algoritme gebruikt voor het bepalen van de kortste route, omdat dit de meest bekende is van de twee, en omdat er binnen het bedrijf al code geschreven is voor het Dijkstra-algoritme.
- Voor het modelleren van routekeuze wordt in deze scriptie een gebruikersevenwichts-toedeling gebruikt, om precies te zijn MSA. Bij het gebruikersevenwicht kan geen enkele verkeersdeelnemer zijn reistijd verkleinen door een andere route te kiezen.
- Bij het systeemoptimum is de opgetelde reistijd van alle verkeersdeelnemers minimaal.
- In dit onderzoek wordt geen stochastisch model gemaakt.
- In dit onderzoek kan een tweelaags model geformuleerd worden.
- Door de Braess-paradox kan het zijn dat de totale reistijd omlaag gaat als er wegen worden afgesloten.
- Sluiten wegen
 - In het vervolg van dit onderzoek wordt, net als in het artikel van Ma et al. (2018), bij het bepalen welke wegen er gesloten moeten worden, een verkeerstoedeling volgens een optimum gemaakt.
 - Bij het sluiten van wegen moet worden gezorgd dat alle bestemmingen bereikbaar blijven, bijvoorbeeld met het onderbord 'uitgezonderd bestemmingsverkeer'.
- Eenrichtingsverkeer
 - De verkeersmaatregel 'eenrichtingsverkeer instellen' kan meestal worden gemodelleerd met een model voor het sluiten van wegen. Daarom wordt deze verkeersmaatregel niet meegenomen in het vervolg van dit onderzoek.
- Verlagen maximumsnelheid
 - Door de maximumsnelheid op een sluipteg te verlagen wordt de reistijd langer, waardoor mensen en verkeersmodellen minder snel die sluipteg zullen nemen.
 - Om te bepalen welke wegen onaantrekkelijker gemaakt moeten worden, kan worden gekeken naar het verschil tussen een optimale situatie (bijvoorbeeld het systeemoptimum) en de huidige situatie (het gebruikersevenwicht). Wegen die in de optimale situatie veel minder gebruikt worden dan in de huidige situatie, zijn wegvakken die 'ontmoedigd' zouden moeten worden door het verlagen van de maximumsnelheid.

Met deze conclusies is antwoord gegeven op deelvraag 4: "Welke methodieken worden in de literatuur gebruikt om de maatregelen te plannen die horen bij de verkeersborden in deelvraag 2?"

5. Onderzoeksopzet

In dit hoofdstuk staat welke stappen er worden gezet in het onderzoek.

In paragraaf 5.1 en 5.2 en staan de voorbereidende stappen: het verzamelen van informatie over wegvakken en het bepalen van de vraag naar vervoer. Vervolgens worden in 5.3 de geïmplementeerde modellen besproken. In 5.4 staan de stappen die worden genomen die betrekking hebben op de modellen. Tot slot worden in paragraaf 5.5 de doelfuncties opgesteld en beargumenteerd.

5.1. Wegvakkentabel maken

Er is informatie nodig over de wegvakken, zoals de capaciteit van een wegvak, de lengte en de lengte in de bebouwde kom. Het proces van het verzamelen en samenvoegen van informatie over wegvakken is weergegeven in Bijlage III. Waar deze informatie exact voor nodig is, zal blijken in de volgende paragrafen in dit hoofdstuk.

5.2. Vervoersvraag-tabel maken

De volgende stap is het maken van een tabel waarin elke rij het aantal voertuigen weergeeft dat een reis wil maken van een herkomst naar een bestemming: de zogenaamde 'vervoersvraag'. Vanaf dit moment worden de herkomsten en bestemmingen die bij zo'n rij horen 'herkomst-bestemmings-paren' of 'HBs' genoemd.

Bij het maken van de vervoersvraag-tabel wordt de Floating Car Data gebruikt, die beschreven en geanalyseerd is in hoofdstuk 3.

Bij het maken van de vervoersvraag-tabel worden de volgende stappen gezet:

- Tijdslot kiezen & data importeren
- Uitsplitsen van session_id in reis_ids
- Filteren en wegen van de data
- Groeperen van herkomsten en bestemmingen
- De *wegvakken* van de herkomsten en de bestemmingen omzetten in *punten*, omdat de code werkt met start- en eindpunten in plaats van wegvakken

In het vervolg van deze paragraaf worden deze stappen verder uitgewerkt.

Tijdslot kiezen & data importeren

Er moet een tijdslot worden gekozen dat wordt geanalyseerd. Het ligt voor de hand om een tijdslot van een uur te kiezen.

Uit de data-analyse in hoofdstuk 3 bleek dat de drukste momenten de ochtend- en de avondspits zijn, beide op werkdagen. Door het aantal voertuigen op werkdagen in de Floating Car Data te tellen, gegroepeerd per tijdslot van een uur, kan worden bepaald welk tijdslot precies het drukste is. In Tabel 4 is hiervan de top 5 weergegeven.

Tabel 4 Top 5 van drukste tijdsloten in gemeente Vijfheerenlanden

Tijdslot	Aantal voertuigen
07:00 – 08:00	42617.83
08:00 – 09:00	38298.72
16:00 – 17:00	35415.45
17:00 – 18:00	35165.37
06:00 – 07:00	34471.98

Uit Tabel 4 blijkt dat het drukste tijdslot in Vijfheerenlanden in de ochtendspits viel: tussen 7:00 uur en 8:00 uur. In de avondspits was het drukste moment tussen 16:00 uur en 17:00 uur. Omdat uit het contextueel literatuuronderzoek in hoofdstuk 2 bleek dat er in Vijfheerenlanden overlast was van sluipverkeer in de avondspits, is als tijdslot de avondspits gekozen, dus tussen 16:00 en 17:00.

Bij het tellen is gecorrigeerd met de wegingsfactoren, zoals verderop in deze paragraaf wordt uitgelegd.

Als alleen de metingen worden geïmporteerd die precies in het tijdvak vallen, eindigt een deel van de reizen in het midden van het gebied. Dit zou een vertekening geven van de werkelijke herkomsten- en bestemmingen. Om hiervoor te corrigeren wordt van de *reizen* die tijdens het tijdslot in gemeente Vijfheerenlanden waren, alle metingen meegenomen die in het gebied vallen, dus ook de metingen die voor en na het tijdslot vielen.

Uitsplitsing van *session_ids* in *reis_ids*

Uit hoofdstuk 3 bleek dat elk voertuig per dag een *session_id* krijgt, ook als een voertuig op een dag meerdere reizen maakt. Daarom was in hoofdstuk 3 geconcludeerd dat er een uitsplitsing gemaakt moet worden als er meer dan 20 minuten geen metingen zijn verstuurd.

Om onderscheid te maken, is er een kolom '*reis_id*' toegevoegd. Een reis die begint in gemeente Vijfheerenlanden, dan een stuk van meer dan 20 minuten rijdt buiten Vijfheerenlanden, en dan weer verderrijdt in Vijfheerenlanden, wordt in dit onderzoek dus uitgesplitst in twee losse reizen.

Wegen en filteren op voertuigtype

In hoofdstuk 3 werd geconcludeerd dat de Floating Car Data gewogen moet worden met *lusdata*, omdat er anders een onderschatting is van het aantal voertuigen en bepaalde categorieën voertuigen oververtegenwoordigd zijn. In Bijlage II staat de keuze van de meetlussen en de berekening van de wegingsfactoren uitgewerkt.

In hoofdstuk 3 werd geconcludeerd dat er in de Floating Car Data weinig voertuigen waren in de categorieën 'bus', 'other', en 'unknown'. Er kan worden aangenomen dat deze voertuigen ook in werkelijkheid een klein deel van het verkeer vormen. Hierdoor zou het modelleren, en het bepalen van de wegingsfactoren, onnauwkeurig zijn. Daarom worden de reisbewegingen van deze voertuigcategorieën niet meegenomen in het vervolg van het onderzoek. Er zijn ook enkele reizen van *session_ids* waarbij het voertuigtype leeg is (zogenaamde 'missende waarden'). Ook deze reizen zijn niet meegenomen in het vervolg van het onderzoek.

Uit de berekeningen kwamen de wegingsfactoren die zijn weergegeven in Tabel 5.

Tabel 5 Wegingsfactor per voertuigtype, berekend met lusdata. De factoren zijn afgerond op drie decimalen.

Voertuigtype	Wegingsfactor
Car	390.967
Lcv (bestelbusje)	17.185
truck	37.696

Omdat er vijf werkdagen zijn meegenomen bij het importeren van de data, is de vervoersvraag na het wegen vermenigvuldigd met 0,2. Op deze manier wordt er gerekend met de vervoersvraag van een 'gemiddelde werkdag'.

Groeperen van herkomsten en bestemmingen

De herkomsten en de bestemmingen die binnen een bebouwde kom vallen, worden allemaal aan een hetzelfde wegvak in het midden van die bebouwde kom gekoppeld. Hierdoor wordt het model overzichtelijker en beter, omdat er minder herkomsten en bestemmingen zijn.

Dit wegvak wordt gekozen uit alle wegvakken met Functional Road Class 6 die minstens deels binnen die bebouwde kom vallen. De Functional Road Class is een maat voor de 'belangrijkheid' van een weg, en Functional Road Class 6 is de kleinste categorie wegen die toegankelijk is voor autoverkeer. Door de bebouwde kommen aan deze kleinste categorie te koppelen, wordt gegarandeerd dat het model bestemmingsverkeer over kleine wegen heen modelleert.

Van wegvak naar punt

Het Dijkstra-algoritme van Analyze werkt met start- en eindpunten, niet met start- en eindwegvakken. Daarom moeten de wegvakken in de vervoersvraag worden omgezet naar punten. Het begin van het eerst gedetecteerde wegvak binnen de gemeente wordt gebruikt als beginpunt

van de reis, en het eind van het laatst gedetecteerde wegvak binnen de gemeente wordt gebruikt als eindpunt van de reis. Hierdoor krijgt het doorgaande verkeer dus herkomsten en bestemmingen vlak bij de gemeentegrens.

Er waren enkele reizen waar er volgens de code geen route mogelijk was. Een deel van deze problemen is opgelost door de herkomst of de bestemming handmatig te corrigeren. Waar dit niet mogelijk was, zijn de 'vervoersvragen' niet meegenomen in de verdere analyse.

Positief en negatief wegvak

In paragraaf 3.1 bleek dat sommige wegvakken in twee varianten in de tabel staan: een keer met een positief id, en een keer met een negatief id. De variant met het negatieve id is de 'gespiegelde' versie van de variant met het positieve id. In Tabel 6 is hiervan een illustratief voorbeeld te zien.

Tabel 6 Illustratief voorbeeld van 'omgekeerd' wegvak

(wegvak)id	Source	target	Geometrie
-123	456	789	
123	789	456	

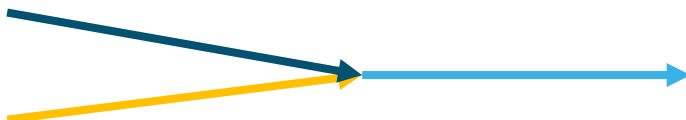
In Tabel 6 is goed te zien dat de source van de positieve variant, de target van de 'negatieve' variant van het wegvak is.

In de Floating Car Data zijn alleen de absolute waarden van de wegvak-id's gebruikt. Hierdoor zijn er in sommige gevallen twee varianten mogelijk, en hierdoor ook twee punten.

In dat geval werd met beide punten geprobeerd, om een route te maken totdat er een werd gevonden waar er een route mogelijk was tussen de herkomst en de bestemming.

Ander wegvak, hetzelfde punt

Overigens zorgde het omzetten van wegvakken naar punten ook dat sommige rijen van de vervoersvraag werden 'samengevoegd', omdat de wegvakken wel verschilden, maar de punten gelijk waren. Dit gebeurt bijvoorbeeld als er een oprit is naar de snelweg: twee wegvakken hebben dezelfde target, dus als de bestemming dan een van die wegvakken is, wordt de bestemming hetzelfde. Een simpele illustratie hiervan is weergegeven in Figuur 10.



Figuur 10 Twee bestemmings-wegvakken die hetzelfde bestemmings-punt hebben

In Figuur 10 zijn drie wegvakken te zien. Het donkerblauwe wegvak heeft dezelfde 'target' als het gele wegvak. Als het donkerblauwe wegvak een bestemming zou zijn, wordt het dus omgezet naar hetzelfde punt, als wanneer het gele wegvak zou worden omgezet naar een punt.

5.3. Geïmplementeerde toedelingsmethodieken

In paragraaf 1 en 2 is uitgelegd hoe twee belangrijke tabellen worden gemaakt:

- een tabel met herkomsten en bestemmingen, en de vervoersvraag daartussen
- een tabel met informatie per wegvak, zoals de lengte en de maximumsnelheid. De informatie over wegvakken gaat worden gebruikt om reistijden en routes te plannen.

Het verkeer uit de eerste tabel gaat worden verdeeld over de wegvakken in de tweede tabel. Voor deze verkeerstoedeling worden in deze paragraaf verschillende toedelingsmethodieken beschreven die zijn geïnspireerd op -of overgenomen uit- het literatuuronderzoek uit hoofdstuk 4. In paragraaf 5.4 worden deze toedelingsmethodieken gebruikt om de twee maatregelen door te rekenen die zijn gekozen in hoofdstuk 4: het afsluiten van wegvakken en het verlagen van de maximumsnelheid op wegvakken.

In elke toedelingmethodiek wordt de reistijd bepaald met de BPR-functie uit hoofdstuk 4.

Gebruikersevenwicht

Om de verdeling van verkeer te berekenen, gegeven een netwerk, wordt het gebruikersevenwicht gemodelleerd. Het gebruikersevenwicht is beschreven in hoofdstuk 4. In het gebruikersevenwicht kan niemand zijn reistijd verkleinen door een andere route te nemen. Uit hoofdstuk 4 bleek dat de verkeerstoedeling bij het gebruikersevenwicht kan worden bepaald met het algoritme MSA. Dit algoritme is geïmplementeerd in dit onderzoek en werkt als volgt:

1. Stel voor elk wegvak a : $t_a = \text{freeflow_reistijd}$ en $x_a = 0$.
2. Doe n iteraties:
 - a. Bepaal het deel van het verkeer dat opnieuw verdeeld gaat worden, dit is $(1/\text{iteratienummer})$. De iteratienummers beginnen bij 1, dus in de eerste iteratie wordt al het verkeer verdeeld.
 - b. Doe per rij in de vervoersvraag-tabel:
 - i. Bekijk van het verkeer tussen die herkomsten en bestemmingen de intensiteit per wegvak. Haal hier een factor $(1 - \text{dat aantal})$ vanaf. Dit deel van het verkeer wordt namelijk opnieuw verdeeld.
 - ii. Bepaal de (op dit moment) snelste route r tussen h en b . Gebruik hierbij de gemaakte wegvakentabel. Gebruik voor het berekenen van de snelste route het Dijkstra-algoritme, zoals besloten in hoofdstuk 4.
 - iii. Tel die factor $\times V_{hb}$ op bij de intensiteit van de links van de snelste route.
 - c. Herbereken nu de reistijd van elke link, en sla die op bij de linkinformatie.

Dit algoritme convergeert, maar tijdens het convergeren schommelen zowel de totale reistijd als het aantal voertuigen dat een andere route krijgt. Wellicht komt dit doordat de vervoersvraag nogal verschilt per herkomst en bestemming. Omdat de totale reistijd bij elke iteratie schommelt, is het belangrijk om zoveel iteraties te maken, dat de totale reistijd niet al te veel meer wisselt. Daarom is 'n' (het aantal iteraties) ingesteld op 400. Na 400 iteraties verschilde de totale reistijd steeds ongeveer twee minuten met de totale reistijd van de vorige iteratie.

Als na elk HB-paar de reistijden van de wegvakken opnieuw berekend zouden worden dan zouden HBs met weinig vervoersvraag geen kans krijgen om de voor hun snelle routes te pakken, en zou het bovendien uitmaken in welke volgorde de vervoersvraag wordt doorlopen. Daarom is ervoor gekozen om de reistijden pas her te berekenen nadat al het verkeer opnieuw is verdeeld.

Het algoritme is versneld door na 30 iteraties te kijken welke herkomst-bestemmingsparen maar één route gebruikten. Voor deze HBs wordt aangenomen dat er in de rest van het algoritme ook geen andere route zal worden genomen, omdat deze route verreweg de snelst mogelijke route is of omdat er nooit congestie is op de route en deze hierdoor nooit zal veranderen. Daarom worden deze HBs in het vervolg van de iteraties niet meer 'herverdeeld'. Dit bleek de meerderheid van de routes te zijn, dus deze verbetering zorgt voor een aanzienlijke versnelling van het algoritme.

Optimale verdelingen

De symbolen die in deze paragraaf worden gebruikt zijn te vinden in de Symbolenlijst.

In hoofdstuk 4 werd gesproken over het systeemoptimum: een theoretische verdeling van het verkeer waar de totale reistijd zo klein mogelijk is. In dit onderzoek zijn verschillende 'optima' gedefinieerd, waaronder dus het systeemoptimum. Om deze optima te berekenen is gebruik gemaakt van scipy: een library voor optimaliseringsproblemen in Python. Hier is het volgende model gemaakt:

- Doelfunctie: verschilt per model. Een doelfunctie is een formule waarmee berekend wordt hoe 'goed' een oplossing is.
- Richting: minimalisatie
- Beslisvariabelen: $f_r \forall r \in R$: de intensiteit op elke route
- Restrictie: $f_r \geq 0 \forall r \in R$: elke intensiteit is groter of gelijk aan nul.

In de verschillende optima verschilt dus de doelfunctie. Bij sommige optima worden er hiernaast nog extra restricties toegevoegd.

Om deze optima te bepalen, zoals bijvoorbeeld Ma et al. (2018) dat doen bij het minimaliseren van de totale reistijd, moet al bekend zijn welke routes er per herkomst en bestemming genomen kunnen worden. In deze implementatie van de optima worden daarom alleen de routes (en daarmee wegvakken) gebruikt die in het gebruikersevenwicht zijn bepaald. Dit is een vereenvoudiging.

Een punt van mogelijke kritiek is dat het in scipy niet mogelijk is om geheel-tallig te programmeren. Hierdoor worden er ‘delen van voertuigen’ aan routes toegewezen. Dit levert geen problemen op, omdat ‘delen van voertuigen’ geen grote invloed hebben op de doelfunctiewaarde of de drukte: een voertuig meer of minder maakt geen groot verschil.

Systeemoptimum

In hoofdstuk 4 is ingegaan op het principe van het systeemoptimum: de minimalisatie van de totale reistijd. De doelfunctie bij het systeemoptimum is:

$$\sum_{a \in A} t_a * x_a$$

Anti-sluip-optimum

In het netbesproken systeemoptimum wordt de som van reistijd * intensiteit geminimaliseerd. Dit onderzoek gaat over het minimaliseren van sluipverkeer, daarom geeft het systeemoptimum niet altijd het gewenste effect. Daarom wordt in dit onderzoek een extra toedelingsmanier gebruikt: het ‘anti-sluip-optimum’. Deze toedeling wordt op dezelfde manier berekend als het systeemoptimum, maar doelfunctie is anders. In deze doelfunctie wordt namelijk de reistijd in de bebouwde kom drie keer zo zwaar meegerekend. In dit onderzoek wordt namelijk sluipverkeer door dorpskernen vermeden, en eerder in het onderzoek is vastgelegd dat die dorpskernen worden bepaald door de bebouwde kom. De precieze bepaling van de bebouwde kom is weergegeven in Bijlage IV.

De doelfunctie bij het anti-sluip-optimum is:

$$\sum_{a \in A} t_a * x_a * \left(1 + 2 * \frac{k_a}{l_a}\right)$$

Het zwaarder wegen van reistijd in dorpskernen is een vorm van ‘strafkosten in rekening brengen bij een route langs ongewenste plekken’. In hoofdstuk 2 bleek dat er bij het genereren van maatschappelijk gewenste routes vaker van deze ‘tactiek’ gebruik wordt gemaakt. Het rekenen van strafkosten bij het anti-sluip-optimum valt strikt genomen overigens niet onder het genereren van maatschappelijk gewenste routes, omdat het antisluip-optimum geen routes genereert. Het neemt de routes over van het gebruikersevenwicht.

Linkverwijder-optimum

In het antisluip-optimum wordt een optimale verdeling van het verkeer gemaakt. Een van de mogelijke verkeersmaatregelen in deze scriptie is het afsluiten van wegen. Om de wegen te selecteren die afgesloten kunnen worden, kan het antisluip-optimum gebruikt worden, met hierbij een extra restrictie: dat de intensiteit bij minimaal N wegvakken gelijk moet zijn aan 0. In het artikel van Ma et al. (2018) wordt voor een vergelijkbaar model een waarde van 1 tot 3 voorgesteld voor N. Een verschil is dat in het artikel van Ma et al. (2018) exact N links worden gesloten, terwijl in dit onderzoek minimaal N links worden gesloten. In dit onderzoek wordt een waarde van N gebruikt van 1. Dit betekent dat het model minimaal één wegvak zal sluiten.

Zonder toevoeging van deze restrictie wordt wellicht een verkeerstoedeling gemaakt waarin elk wegvak gebruikt wordt. Met toevoeging van de restrictie kan het model gebruikt worden om links te selecteren die wellicht gesloten kunnen worden om sluipverkeer te verminderen.

Of het sluipverkeer daadwerkelijk vermindert is niet zeker, omdat er bij het sluiten van links ook nieuwe routes kunnen ontstaan die juist een negatieve invloed hebben op de hoeveelheid sluipverkeer. Deze optimalisatie-functies kunnen namelijk geen nieuwe routes genereren, maar gebruiken de routes uit het gebruikersevenwicht. Daarnaast is het zo dat deze modellen een 'optimale' situatie modelleren, en niet een situatie volgens het gebruikersevenwicht. Daarom moet na het berekenen van zo'n optimum nog een gebruikersevenwichts-toedeling worden gedaan, zoals zal blijken uit paragraaf 5.4.

Herhaling

Deze paragraaf is wellicht wat onoverzichtelijk, daarom hieronder een opsomming met beschrijvingen van elke toedelingsmethodiek:

- Gebruikersevenwicht: de situatie waarin iedere reiziger de route kiest die op dat moment het kortste is. Een aanname is dat die situatie overeenkomt met de werkelijkheid.
- Optima: situaties waarin de functiewaarde (uitkomst van de doelfunctie) geminimaliseerd wordt. Hier zijn drie varianten van gebruikt:
 - Systeemoptimum: Minimalisatie van de totale reistijd
 - Antisluit-optimum: Minimalisatie van de totale reistijd, met penalty voor reistijd in de bebouwde kom
 - Linkverwijder-optimum: Minimalisatie van de totale reistijd, met penalty voor reistijd in de bebouwde kom, en tevens de restrictie dat de intensiteit op minstens 1 wegvak 0 is.

5.4. Onderzoeksopzet verkeersmaatregelen

Met de toedelingsmodellen uit paragraaf 5.3 kan nu de volgende onderzoeksopzet worden geformuleerd:

Huidige situatie

- 1) Maak een gebruikersevenwichts-verdeling volgens de 'normale' situatie

Maatregel 1: het sluiten van wegvakken

- 1) Maak een verdeling volgens het linksluit-optimum: een geoptimaliseerde situatie waarin er zo min mogelijk sluipverkeer is en er minstens 1 link gesloten wordt.
- 2) Haal de wegvakken die niet worden gebruikt in het linksluit-optimum, uit de wegvakkentabel
- 3) Bereken gebruikersevenwicht volgens deze nieuwe situatie.

Maatregel 2: het langzamer maken van wegvakken

- 1) Maak een verdeling volgens het antisluit-optimum. Vergelijk deze met het gebruikersevenwicht. Wegvakken die in het systeemoptimum maximaal half zoveel worden gebruikt als in de huidige situatie, zijn wegvakken die 'ontmoedigd' moeten worden.
- 2) Verlaag de maximumsnelheid van deze wegvakken met 20 kilometer per uur
- 3) Bereken gebruikersevenwicht volgens deze nieuwe situatie.

Het systeemoptimum wordt dus alleen gebruikt om de doelfunctiewaarden mee te vergelijken.

5.5. Doelfunctie(s)

Als het verkeer is verdeeld met de verschillende toedelingsmethodieken, kan door middel van doelfuncties worden gekeken welke toedelingsmethodiek het 'beste' werkte. "Beste" kan op meerdere manieren, dus zijn er ook meerdere doelfuncties gebruikt. Er zijn drie doelfuncties 'ontworpen', die in paragraaf 6.3 gebruikt gaan worden om de toedelingen met elkaar te vergelijken. Deze drie doelfuncties worden in deze paragraaf een voor een besproken.

In dit onderzoek worden doelfuncties dus op twee manieren gebruikt: in paragraaf 5.3 gebruikt een model een doelfunctie om een optimale toedeling te vinden, en in deze paragraaf worden doelfuncties genoemd die gebruikt gaan worden om verschillende toedelingen met elkaar te vergelijken.

Totale Reistijd

De Totale Reistijd wordt bepaald door van elke route (r) de reistijd van alle links (t_{a_r}) op te tellen, en te vermenigvuldigen met de intensiteit (f_r), en de waarden van al die routes op te tellen. In formulevorm:

$$\text{Totale Reistijd} = \sum_{r \in R} \left(f_r \sum_{a_r \in A_r} t_{a_r} \right)$$

De totale reistijd is een algemene maat om te bepalen hoe optimaal een toedeling van verkeer over een netwerk is. Hij wordt geminimaliseerd in de systeemoptimum-toedeling uit paragraaf 5.3.

Totale Komtijd

In dit onderzoek wordt gekeken naar sluipverkeer in dorpskernen. In de situatiebeschrijving is vastgelegd dat voor de dorpskernen de grenzen van de bebouwde kom worden gebruikt. De totale reistijd binnen de bebouwde kom geeft daarom een indicatie van sluipverkeer in dorpskernen, en wordt in dit onderzoek de 'Totale Komtijd' genoemd.

De Totale Komtijd is bepaald door de reistijd op te tellen die in de bebouwde kom wordt gereden. Die reistijd wordt bepaald door de reistijd van een link (t_{a_r}) te vermenigvuldigen met de fractie van die link die in de bebouwde kom ligt (de lengte van het wegvak dat in de kom ligt: k_{a_r} , gedeeld door de lengte van het wegvak l_{a_r}). In formulevorm:

$$\text{Totale Komtijd} = \sum_{r \in R} \left(f_r \sum_{a_r \in A_r} \frac{k_{a_r}}{l_{a_r}} * t_{a_r} \right)$$

Met deze doelfunctie wordt de overlast binnen dorpskernen beperkt, door de reistijd in de bebouwde kom te minimaliseren.

Klenewegtijd

Bij de 'Klenewegtijd' wordt de reistijd opgeteld op wegen met een Functional Road Class boven de vier. Dit zijn wegen met een maximumsnelheid kleiner of gelijk aan 50. De Klenewegtijd geeft, samen met de Totale Komtijd, een indicatie van de hoeveelheid sluipverkeer. In formulevorm:

$$\text{Klenewegtijd} = \sum_{r \in R} \left(f_r \sum_{a_r \in A_r} t_{a_r} * (frc_{a_r} > 4) \right)$$

5.6. Conclusie

De eerste stap in het onderzoek is het maken van een tabel met informatie over wegvakken, en een tabel met informatie over de vervoersvraag. Vervolgens wordt de verkeerstoedeling in de huidige situatie berekend. Daarna worden verschillende verkeers-toedelingsmodellen geïmplementeerd om te bepalen welke wegvakken er worden afgesloten en bij welke wegvakken de maximumsnelheid wordt verminderd. Vervolgens wordt er met de nieuwe wegvakken-tabellen een nieuwe gebruikersevenwichts-toedeling gedaan. Er zijn dan drie gebruikersevenwichts-toedelingen: die van de huidige situatie, die van de situatie na het afsluiten van wegvakken, en die van het verminderen van de maximumsnelheid van wegvakken. Deze drie toedelingen gaan worden vergeleken op basis van drie doelfuncties: de totale reistijd, de totale reistijd in de bebouwde kom, en de totale reistijd op kleine wegen.

Bij de analyse wordt het drukste tijdslot in de avondspits gekozen: van 16:00 tot 17:00.

In dit hoofdstuk is antwoord gegeven op deelvraag 5: "Hoe zijn die methodieken te combineren tot een model dat geschikt is voor dit onderzoek?"

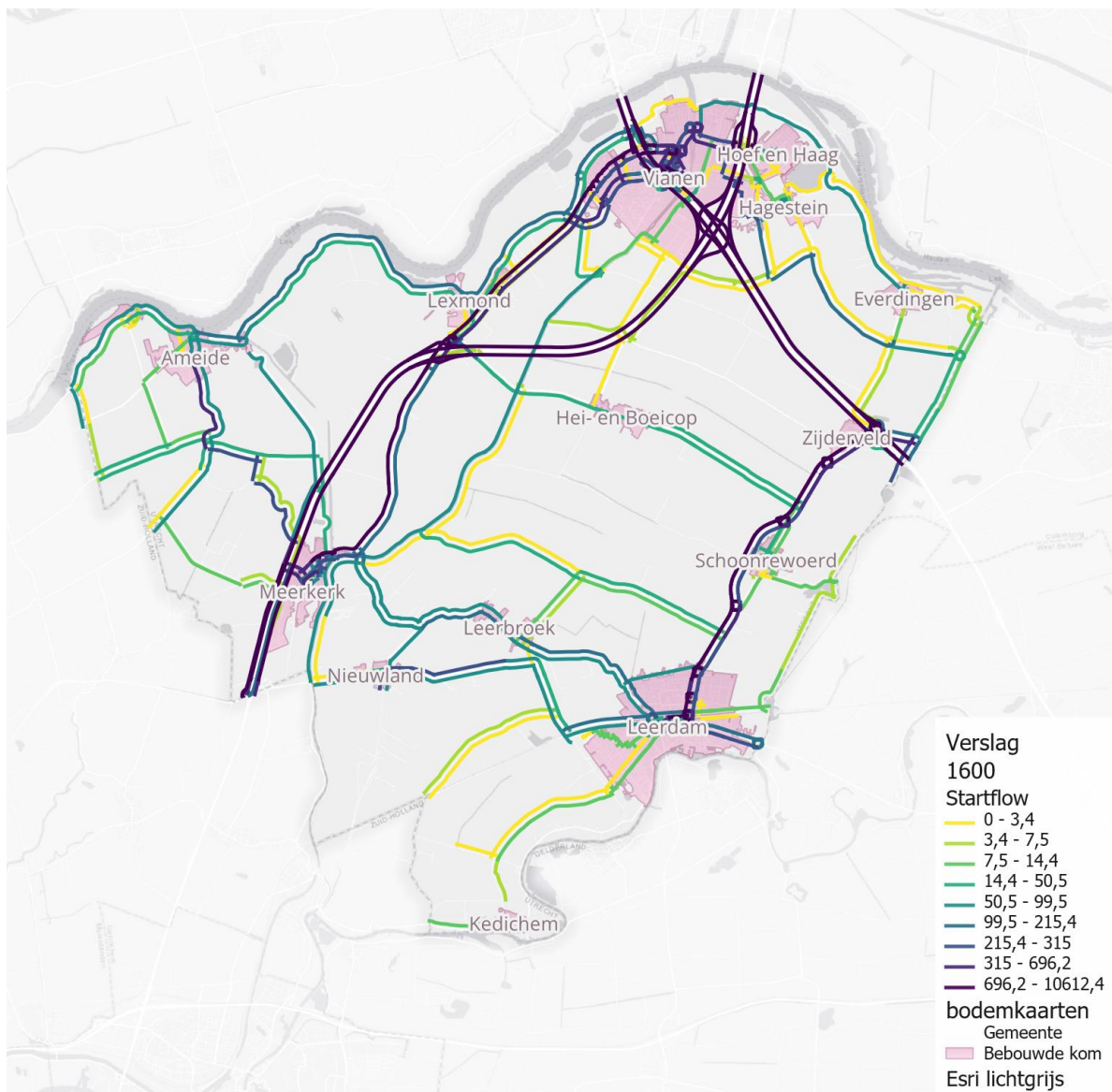
6. Resultaten

In dit hoofdstuk wordt eerst gecontroleerd of de output bij het modelleren van de huidige situatie realistisch is. Daarna worden de doelfunctiewaarden van de verschillende toedelingen geanalyseerd en met elkaar vergeleken. Hierbij wordt extra aandacht besteed aan de evenwichtstoedelingen. Daarna wordt onderzocht wat het effect van de gekozen maatregel op de ochtendspits is. Vervolgens wordt ingegaan op de praktijk: welke verkeersborden worden er neergezet, en kunnen de verkeersmaatregelen direct geïmplementeerd worden? Tot slot wordt gecontroleerd of is voldaan aan de uitgangspunten.

In de eerste drie paragrafen wordt het tijdslot van 16:00 uur tot 17:00 gemodelleerd, zoals besloten in hoofdstuk 5. Daarna komt ook het drukste tijdslot in de ochtendspits aan bod: van 7:00 uur tot 8:00.

6.1. Controle aannemelijkheid

In Figuur 11 is de 'uitgangssituatie' te zien: de huidige situatie volgens het gebruikersevenwicht. In de figuur zijn de wegen wat verschoven, om te zorgen dat ze elkaar niet overlappen. Wegen met tweerichtingsverkeer zijn hierdoor twee keer weergegeven, voor elke richting een keer.

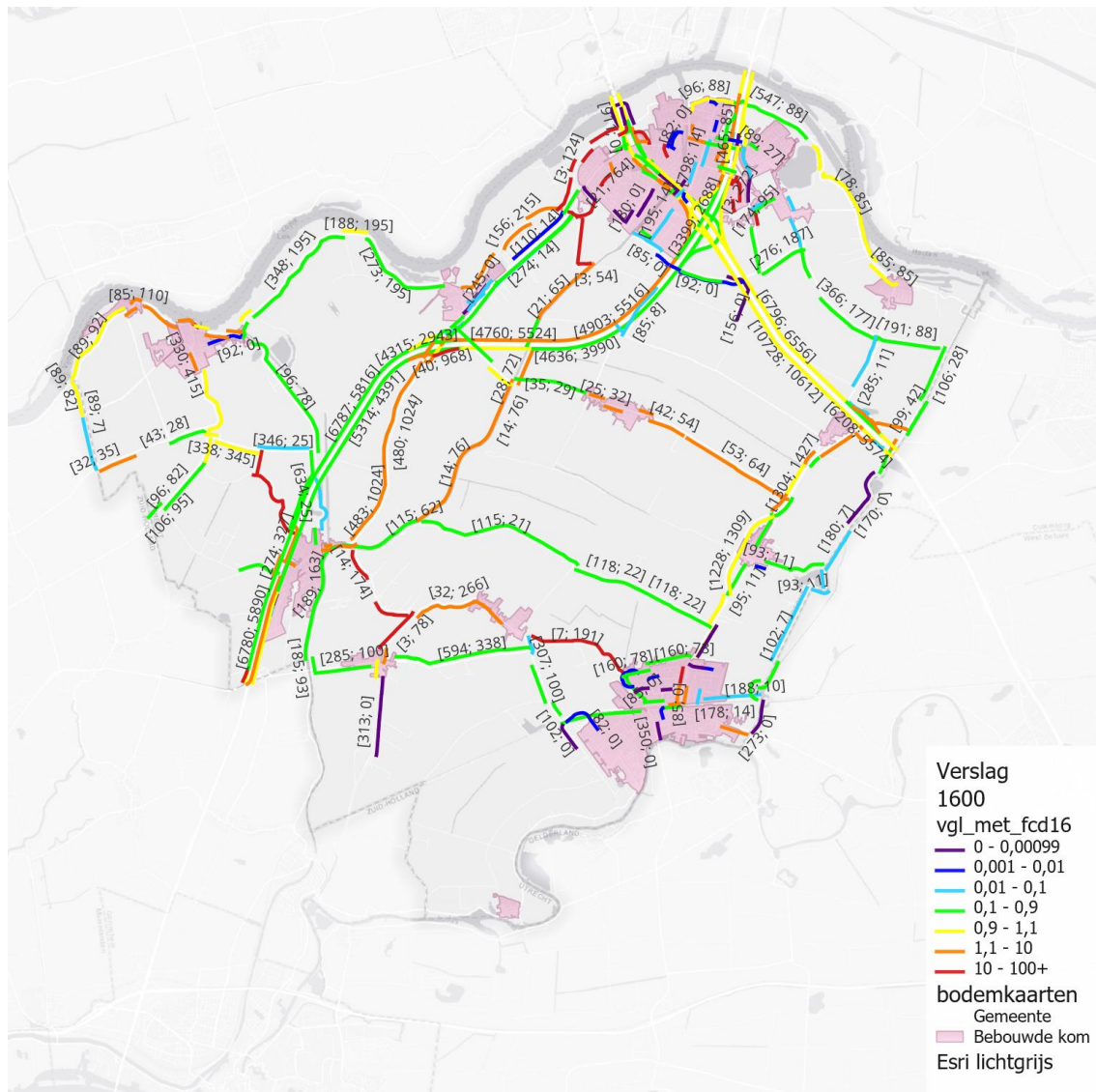


Figuur 11 Intensiteiten bij gebruikersevenwicht. De wegen zijn verschoven om te zorgen voor minder overlap. Wegen met tweerichtingsverkeer zijn hierdoor twee keer weergegeven. Achtergrondkaart: World_Light_Gray_Base (MapServer) van Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community.

In Figuur 11 is te zien dat er veel verkeer over de snelwegen gaat. Dit is in lijn met de verwachting: het is logisch dat er veel verkeer over de snelwegen gaat. Verder gaat er veel verkeer langs of door Schoonrewoerd, Vianen, Lexmond en Meerkerk.

Huidige situatie: Vergelijking met Floating Car Data

Om na te gaan hoe goed de modellering van de huidige situatie overeenkomt met de werkelijke situatie, wordt deze vergeleken met de waarnemingen van de Floating Car Data. In Figuur 12 is daarom het verschil te zien tussen 'fcd' (de Floating Car Data) en de evenwichtstoedeling. In deze vergelijking is de Floating Car Data al gewogen met de wegingsfactoren, zoals uitgelegd in hoofdstuk 5 en Bijlage I



Figuur 12 verhouding $\frac{\text{gemodelleerde gebruikersevenwicht}+0.1}{fcd+0.1}$

Achtergrondkaart: World_Light_Gray_Base (MapServer) van Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community.

In Figuur 12 is met kleuren de uitkomst van $\frac{\text{gemodelleerde gebruikersevenwicht}+0.1}{fcd+0.1}$ weergegeven.

Hierbij zijn er alleen wegen weergegeven waar de som van het aantal voertuigen volgens het model en het aantal voertuigen dat gemeten is met de Floating Car Data groter is dan 50. Dit om de kaart overzichtelijk te houden. Ook zijn alleen de wegvakken langer dan 150 meter meegenomen, omdat anders de Floating Car Data sowieso een onderschatting vormt. Dit komt doordat niet elk voertuig

wordt gemeten op alle korte wegvakken waar het overheen gaat, omdat er maar elke 3 of elke 10 seconden een meting wordt gedaan.

De paarse, blauwe en groene wegvakken in Figuur 12 hebben een waarde onder de één. Dit betekent dat de intensiteit die gemodelleerd is kleiner is dan de intensiteit die bepaald is met de Floating Car Data. Bij de oranje en rode wegvakken is de gemodelleerde waarde juist groter dan die van de Floating Car Data. Rode wegvakken zijn dus plekken waar het model overschat, en groene, blauwe en paarse wegvakken zijn plekken waar het model onderschat. Op de gele wegvakken ligt de waarde rond de 1, dit betekent dat de gemodelleerde waarde en de waarde bij de Floating Car Data ongeveer gelijk zijn aan elkaar.

Er is gekozen om 0.1 bij beide getallen op te tellen, om problemen met delen door 0 te voorkomen.

In Figuur 12 geven de getallen bij de wegvakken eerst de intensiteit weer die berekend is met de Floating Car Data. Daarna geven ze de intensiteit weer die gemodelleerd is voor de huidige situatie (het gebruikersevenwicht). Als een wegvak een positieve en een negatieve variant had (zoals uitgelegd in paragraaf 5.2) dan zijn in deze figuur de intensiteiten in beide richtingen bij elkaar opgeteld.

In Figuur 12 is te zien dat de toedeling op veel plekken niet overeenkomt met de Floating Car Data. (Dit komt deels door het 'groeperen' van de herkomsten en bestemmingen, uitgelegd in paragraaf 5.2). Door dat groeperen hebben bestemmingen binnen de bebouwde kom allemaal dezelfde bestemming gekregen in het midden van die bebouwde kom, terwijl in werkelijkheid waarschijnlijk geen van de voertuigen precies dat wegvak als bestemming had. Hetzelfde geldt voor de herkomsten.

Wel is te zien dat de getallen over het algemeen in dezelfde orde van grootte liggen, en dat het model dus redelijk werkt.

De snelwegen hebben bijna geen rode of blauwe wegen. Er zijn alleen enkele kleine rode wegvakken op de snelwegen. Daarom kan worden geconcludeerd dat het modelleren van de intensiteit op de snelwegen naar behoren gaat.

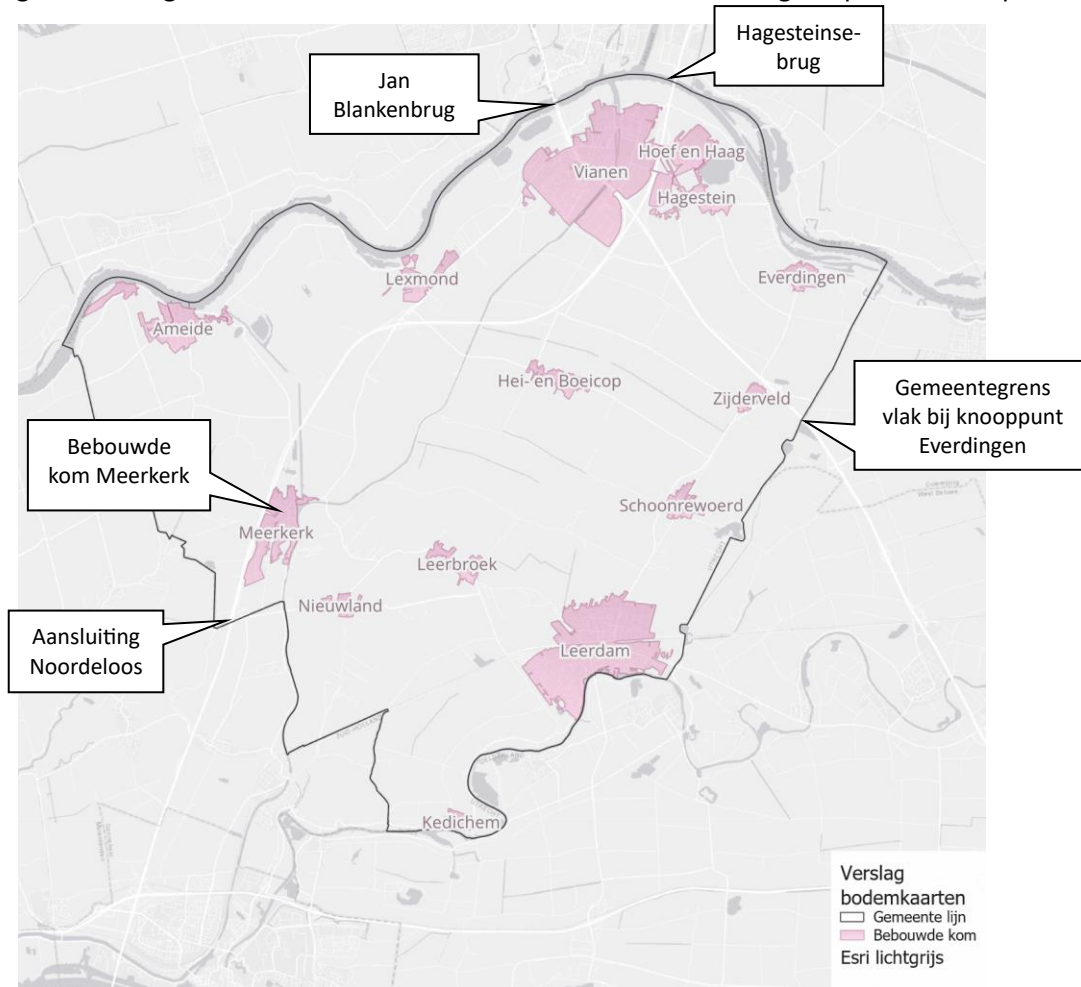
Correctie van het wegvak bij de Jan Blankenbrug

Linksboven bij Vianen is een paars wegvak te zien.. Hier worden geen voertuigen gemodelleerd, terwijl die er wel zijn volgens de Floating Car Data. Dit komt door een handmatige correctie. Het paarse wegvak is namelijk een kleine weg die onder de Jan Blankenbrug (aangewezen in Figuur 13) doorloopt. De metingen van de Floating Car Data die door Analyse aan dit wegvak gekoppeld waren, bleken eigenlijk alleen op de Jan Blankenbrug te hebben gereden. Daarom is besloten om de vervoersvraag handmatig te corrigeren, door alle herkomsten en bestemmingen te veranderen van die dijk, naar een wegvak op de Jan Blankenbrug. Hierdoor is het grote verschil ontstaan bij het wegvak vlak bij de Jan Blankenbrug.

Huidige situatie: Visualisatie van routes

Om het model te controleren is gekeken naar de top 5 van herkomsten- en bestemmingen. Van deze herkomst- en bestemmingsparen zijn de 'voorspelde' routes inclusief aantallen weergegeven. Soms zijn ook de metingen van de Floating Car Data weergegeven. De herkomsten- en bestemmingen zijn in willekeurige volgorde weergegeven.

Figuur 13 kan gebruikt worden om de herkomsten- en bestemmingen op te zoeken op een kaart.



Figuur 13 Overzicht veelvoorkomende herkomsten- en bestemmingen. Achtergrondkaart: World_Light_Gray_Base (MapServer) van Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community.

De tabellen zijn als volgt opgebouwd:

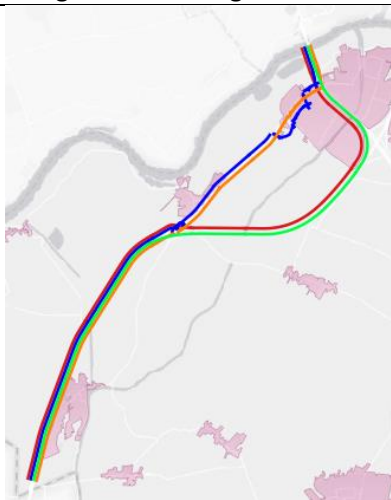
- De eerste regel bevat het herkomst- en bestemmingspunt.
- De tweede regel bevat een 'leesbaardere' locatie die op te zoeken is in Figuur 13.
- De derde regel bevat een kaart met hierop de verschillende routes, en indien nodig ook de Floating Car Data van session_ids die binnen het tijdslot een reis maakten tussen dat herkomst-bestemmings-paar.
- De vierde regel bevat het aantal voertuigen per route volgens het gebruikersevenwicht in de huidige situatie.
- In de laatste regel is ruimte voor eventuele toelichtingen of opmerkingen.

Door de manier van het selecteren van de te importeren data, waarbij de session_ids zijn gesplitst in meerdere reizen en soms ook delen van de reizen worden meegenomen die buiten het tijdslot worden gereden (zie 5.2) komt het in deze tabellen regelmatig voor dat er enkele voertuigen zijn afgebeeld met reizen die niet tussen de herkomst en de bestemming liggen.

De kaarten bevatten geen legenda, maar er worden steeds dezelfde kleuren aangehouden. Daarom is in Figuur 14 de legenda weergegeven van de kaarten in de tabellen met routes in dit hoofdstuk.

- Route 1
- Route 2
- Route 3
- Route 4

Figuur 14 Legenda van tabellen met routes

(267291084, 253269045)	(267291084, 277277041)																					
Jan Blankenbrug → Aansluiting Noordeloos	Hagesteinsebrug → Bij knooppunt Everdingen																					
																						
<table><tr><th>Nr</th><th>Aantal</th><th>Komtijd</th></tr><tr><td>1</td><td>1791.02</td><td>0</td></tr><tr><td>2</td><td>504.80</td><td>2.48</td></tr><tr><td>3</td><td>15.13</td><td>2.19</td></tr><tr><td>4</td><td>311.18</td><td>0</td></tr></table>	Nr	Aantal	Komtijd	1	1791.02	0	2	504.80	2.48	3	15.13	2.19	4	311.18	0	<table><tr><th>Nr</th><th>Aantal</th><th>Komtijd</th></tr><tr><td>1</td><td>4147.90</td><td>0</td></tr></table>	Nr	Aantal	Komtijd	1	4147.90	0
Nr	Aantal	Komtijd																				
1	1791.02	0																				
2	504.80	2.48																				
3	15.13	2.19																				
4	311.18	0																				
Nr	Aantal	Komtijd																				
1	4147.90	0																				
Alle floating-car-punten vallen op wegvakken van de routes, maar er was geen fcd-punt op de links bij Vianen van route 3. De voertuigen in de Floating Car Data namen in het tijdslot dus niet route 3, maar ook in het model werd deze route weinig genomen.	Er zijn punten die (binnen het tijdslot) niet tussen de HBs liggen. Dit komt door de manier waarop de vervoersvraag-tabel is gemaakt. De session_ids zijn gesplitst in meerdere reizen, en er hebben in dit tijdslot meerdere reizen plaatsgevonden.																					

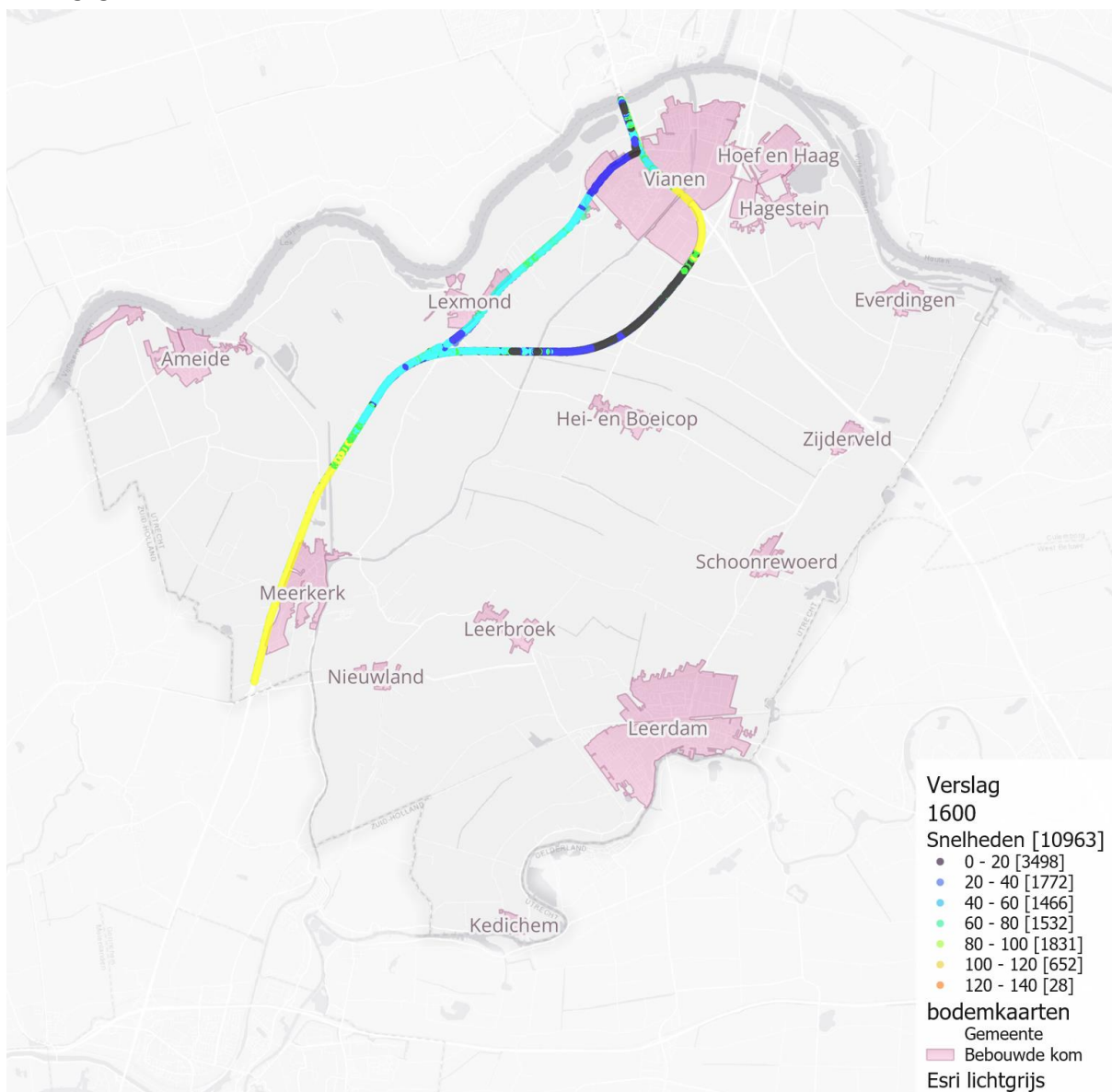
(272291021, 253269045)	(272291021, 277277041)	(277277040, 267291085)																								
Hagesteinsebrug → Aansluiting Noordeloos	Hagesteinsebrug → Bij knooppunt Everdingen	Jan Blankenbrug → Knooppunt Everdingen																								
																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nr</th><th>Aantal</th><th>Komtijd</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td><td>1575.22</td><td>0</td></tr> <tr> <td>2</td><td>346.84</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	Nr	Aantal	Komtijd	1	1575.22	0	2	346.84	0	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nr</th><th>Aantal</th><th>Komtijd</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td><td>2508.64</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	Nr	Aantal	Komtijd	1	2508.64	0	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nr</th><th>Aantal</th><th>Komtijd</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td><td>3827.80</td><td>0</td></tr> <tr> <td>2</td><td>266.82</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	Nr	Aantal	Komtijd	1	3827.80	0	2	266.82	0
Nr	Aantal	Komtijd																								
1	1575.22	0																								
2	346.84	0																								
Nr	Aantal	Komtijd																								
1	2508.64	0																								
Nr	Aantal	Komtijd																								
1	3827.80	0																								
2	266.82	0																								
Routes verschillen alleen linksonder Lexmond. Uit de Floating Car Data blijkt dat enkele voertuigen een andere route nemen, dit zijn 4 voertuigen.	Er wijkt één voertuig af van de route. Deze afwijking is klein, er kan bijvoorbeeld iemand zijn opgehaald of afgezet.	De tweede route neemt bij knooppunt Everdingen een afrit en daarna meteen weer een oprijt. De routes zijn verder hetzelfde.																								

Op de kaarten is te zien dat de routes over het algemeen realistisch zijn. Soms wordt er in het model maar één route gebruikt volgens het model, en in dat geval volgen de meeste voertuigen in de Floating Car Data die route. Ook als er meer routes zijn dan modelleert het model een logische verdeling.

Uit deze analyse van routes blijkt dat het model bij de meestvoorkomende herkomst-bestemmingsparen realistische routes verdelingen modelleert.

Inzoomen op verkeer tussen Jan-Blankenbrug en Noordeloos

Van de hierboven ge-analyseerde herkomst-bestemmingsparen is er één waarin er twee wezenlijk verschillende routes zijn gemaakt in het gebruikersevenwicht. Dit is tussen de Jan Blankenbrug en Noordeloos. Toevallig komt er hier vaak sluipverkeer voor, zo bleek uit het contextueel literatuuronderzoek. Wanneer het verkeer, met bijbehorende snelheid, tussen de Jan Blankenbrug en Noordeloos wordt weergegeven, is de reden van het sluipverkeer goed te zien. In Figuur 15 is dit weergegeven.



Figuur 15 Gereden snelheden in de avondspits van het verkeer tussen de Jan Blankenbrug en Noordeloos. Achtergrondkaart: World_Light_Gray_Base (MapServer) van Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community.

In Figuur 15 is te zien dat er op de snelweg file is: hier zijn de stippen donkerblauw of zwart, wat duidt op snelheden die lager zijn dan normaal op een snelweg. Door de file is de route door Vianen even snel. Het verkeer wat door Vianen rijdt is een typisch voorbeeld van sluipverkeer.

Routes met sluipverkeer

Omdat in de top 5 herkomst-bestemmingsparen maar één combinatie was met sluipverkeer, wordt nog gekeken naar herkomsten- en bestemmingen die nog niet hierboven zijn bestudeerd, en waarvoor geldt dat een van de routes een langere tijd in de bebouwde kom heeft dan de route die zonder verkeer het snelste is. Hiervan zijn de twee meegenomen met de grootste aantallen verkeer. Het verkeer dat hierbij de route door de bebouwde kom neemt, kan gezien worden als sluipverkeer. Een van de herkomst-bestemmingsparen in de top 3 is eerder in deze paragraaf al aan de orde geweest. De rest van de top 3 is hieronder weergegeven.

Aansluiting Noordeloos → Jan Blankenbrug (253269048, 267291085)					Hagesteinsebrug → Bebouwde kom Vianen (267291084, 269288033)				
									
	Nr	Aantal	Komtijd			Nr	Aantal	Komtijd	
	1	494.31	0			1	297.67	2.40	
	2	162.71	2.91			2	1.03	2.41	
	3	164.77	0			3	112.28	2.40	
Route 1 en route 3 zijn bijna hetzelfde. Route 2 wordt niet genomen in de Floating Car Data, maar wel in het model. Hier klopt het model dus niet helemaal met de werkelijkheid. Wel is het zo dat route 2 de minst populaire route is, dit klopt wel met de werkelijkheid.					De routes verschillen alleen in Vianen op enkele wegvakken. Opvallend is dat sommige session_ids binnen het uur ook naar allerlei andere plekken gaan. Waarschijnlijk hebben deze session_ids een tussenstop in Vianen gemaakt van meer dan 20 minuten. Ze hebben dan meerdere reizen gemaakt binnen het tijdslot.				

Hoewel uit de vergelijking met de Floating Car Data bleek dat de intensiteiten op de wegvakken niet altijd helemaal overeenkwamen met de gemodelleerde intensiteiten, blijkt uit bovenstaande visualisaties dat de routes die worden gegenereerd over het algemeen overeenkomen met de routes van de Floating Car Data, zowel bij één als bij meerdere mogelijke routes. Daarom is het gebruikersevenwicht-model voldoende betrouwbaar om te kunnen gebruiken.

6.2. Effecten van maatregelen

In voorgaande paragraaf is duidelijk geworden dat het gebruikersevenwicht-model een realistische toedeling geeft van het verkeer over het netwerk in de huidige situatie. Daarom kan nu het effect van de verkeersmaatregelen worden onderzocht. Er worden twee verkeersmaatregelen doorgerekend. Maatregel 1 is het sluiten van wegvakken, en maatregel 2 is het verlagen van de maximumsnelheid op wegvakken. Hierbij wordt de aanpak uit paragraaf 5.4 gevolgd.

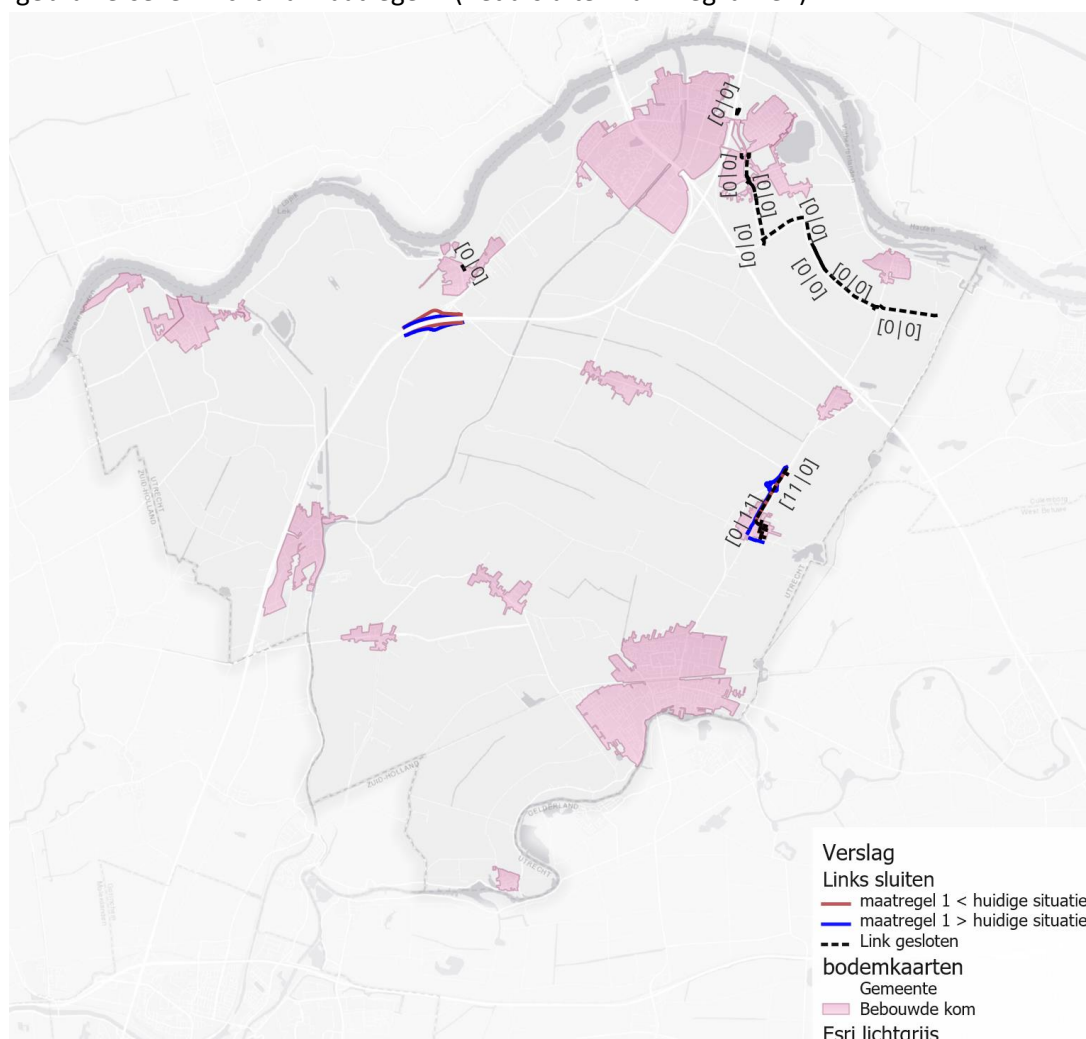
Maatregel 1: Sluiten van wegvakken.

Maatregel 1 (het verwijderen van wegvakken) gaf 50 wegvakken die afgesloten zouden kunnen worden. In Tabel 7 is te zien dat deze wegvakken in de huidige situatie al weinig werden gebruikt.

Tabel 7 Aantal wegvakken dat is afgesloten, gegroepeerd op intensiteit in de huidige situatie

Intensiteit in huidige situatie	Aantal wegvakken
10,949	15
0.213	1
0,064	2
0,009	32

In Figuur 16 is het verschil te zien tussen het gebruikersevenwicht in de huidige situatie en het gebruikersevenwicht na maatregel 1 (het afsluiten van wegvakken).



Figuur 16 Verandering in intensiteit bij sluiten van wegvakken. Achtergrondkaart: World_Light_Gray_Base (MapServer) van Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community.

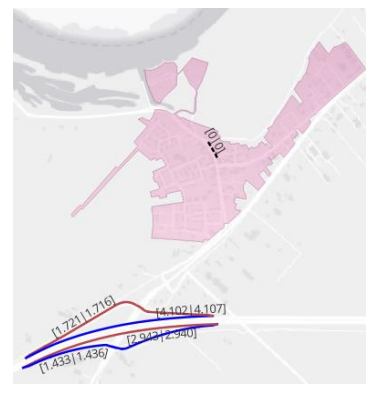
Er zijn in Figuur 16 alleen wegvakken afgebeeld waar de intensiteit met meer dan 1 voertuig is veranderd. Een uitzondering wordt gemaakt voor de markering van de wegvakken die afgesloten worden, die wordt altijd weergegeven, ook als de verandering in intensiteit heel klein is.

Het eerste getal is steeds het gebruikersevenwicht vóór het afsluiten van de wegvakken, en het tweede getal is steeds het gebruikersevenwicht ná het afsluiten van de wegvakken.

In Figuur 16 zijn enkele verschillen te zien tussen de huidige situatie en de situatie na maatregel 1.

De rode wegvakken zijn wegvakken waar in de nieuwe situatie minder verkeer over gaat. Er zijn verschillen te zien bij het knooppunt bij Lexmond, wat wegen bij Schoonrewoerd, en bij een weg naar of vanaf een plek vlak bij knooppunt Everdingen. In Tabel 8 is per gebied een ingezoomde kaart gegeven, en een beschrijving van de verandering.

Tabel 8 Verandering in intensiteit bij maatregel 1, ingezoomd op verschillende plekken

Lexmond en de snelweg bij Lexmond	Schoonrewoerd	Vlak bij knooppunt Everdingen
		
Er wordt een weg afgesloten in Lexmond waar in de huidige situatie al afgerond 0 voertuigen waren. Ook is te zien dat onder Lexmond, op de snelweg, kleine veranderingen zijn in intensiteit. Het is onrealistisch dat dit komt door het sluiten van de wegvakken. Wellicht komt het doordat het gebruikersevenwicht nog niet helemaal goed geconvergeerd was. Het verschil is ook maar enkele voertuigen.	In Schoonrewoerd wordt er een weg afgesloten, waardoor verkeer een weg moet nemen die wellicht iets minder door de bebouwde kom gaat dan de andere weg. Het effect zal ook hier niet groot zijn.	Dit zijn wegvakken tussen een afrit vlak bij Vianen, en een punt vlak bij de gemeentegrens en vlak bij knooppunt Everdingen. Ook hier wordt een weg afgesloten met een intensiteit die afgerond al nul was. Er zijn geen rode of blauwe wegen te zien, dus dit heeft weinig invloed: de wegen worden alleen getekend als het verschil tussen de huidige- en de nieuwe situatie meer dan 1 voertuig is.

In paragraaf 2.2 werd gesproken over de Bentz-Berg-weg, een weg waar veel sluipverkeer was. In Figuur 2 is de ligging van deze weg te zien. De weg is niet weergegeven op Figuur 16. Dit duidt erop dat het afsluiten van wegvakken geen of heel weinig effect heeft op het sluipverkeer op de Benz-Bergweg.

Er kan worden geconcludeerd dat maatregel 1 weinig effect heeft: er verandert weinig aan de verdeling van het verkeer, dus ook weinig aan het sluipverkeer. Dit komt doordat de wegen die afgesloten werden niet zo'n grote intensiteit hadden. Overigens moet als deze maatregel gekozen wordt worden nagegaan of elke geselecteerde weg wel afgesloten kan worden. Er mogen dan geen weggebruikers zijn die hun bestemming of hun herkomst aan deze wegvakken hebben liggen. Het model zorgt dat elke herkomst en elke bestemming van de avondspits bereikbaar blijft, voor andere tijdstippen kan dit niet gegarandeerd worden.

Maatregel 2: Verminderen maximumsnelheid

Maatregel 2 was het verlagen van de maximumsnelheid. In paragraaf 5.4 is te lezen wat er precies gebeurt: alle wegvakken worden geselecteerd waar de intensiteit in de huidige situatie meer dan dubbel zo groot is als de intensiteit in het antisluipt-optimum, en op deze wegvakken wordt de

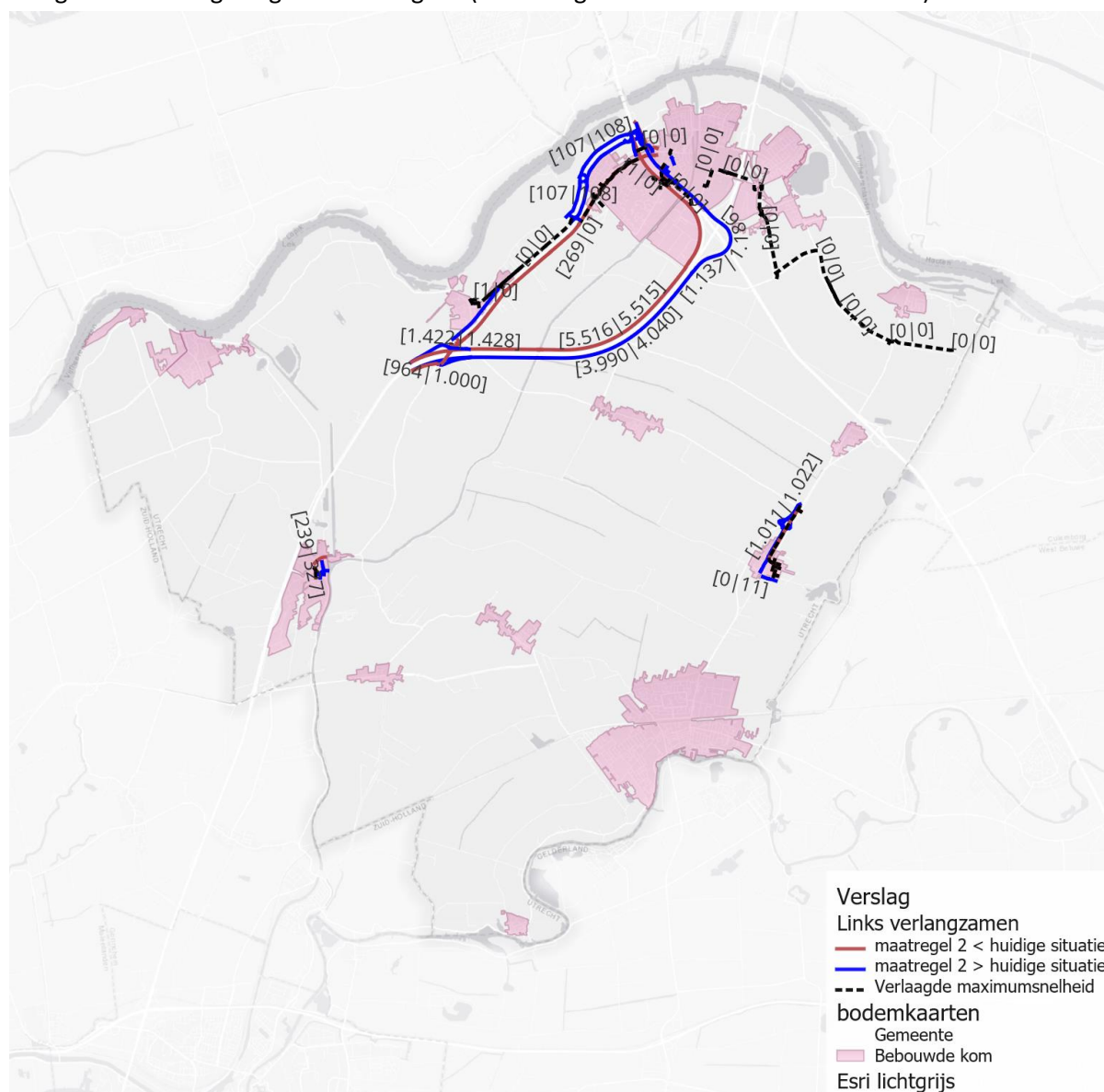
maximumsnelheid verlaagd met 20 kilometer per uur. Door met deze nieuwe wegvakkentabel weer een gebruikersevenwichts-toedeling te maken, ontstaat een nieuwe situatie.

Er zijn in totaal 121 wegvakken verminderd in snelheid. In Tabel 9 is weergegeven hoeveel wegvakken per intensiteit er in snelheid zijn verminderd.

Tabel 9 Aantal wegvakken dat is verminderd in snelheid, gegroepeerd op intensiteit in de huidige situatie

Intensiteit in huidige situatie	Aantal wegvakken
349.025	1
268.780	26
87.564	5
10.949	15
1.211	1
<1	73

In Figuur 17 is het gevolg van maatregel 2 (het verlagen van de maximumsnelheden) te zien.

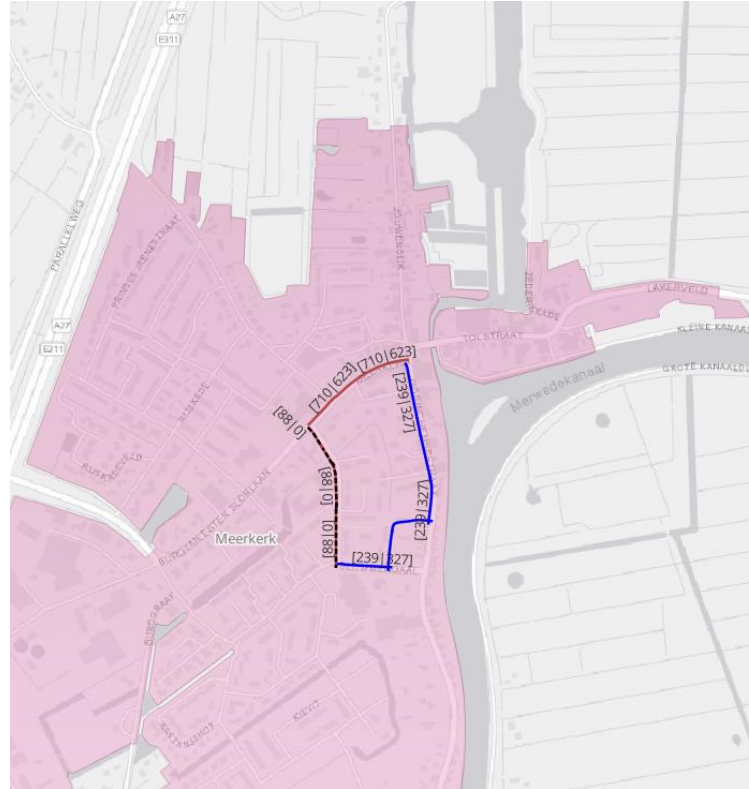


Figuur 17 Verschil in intensiteit bij verlangzamen van wegvakken. Achtergrondkaart: World_Light_Gray_Base (MapServer) van Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS user community.

In Figuur 17 zijn de blauwe wegen de wegen er waar na maatregel 2 situatie meer verkeer is. De rode wegen zijn wegen waar er na maatregel 2 juist minder verkeer op komt. In Figuur 18 en in Figuur 19 zijn uitsneden van Figuur 17 te zien. Ook in deze figuren zijn alleen de wegen weergegeven waar het verschil in intensiteit groter is dan 1, behalve de markering van de wegvakken die langzamer gemaakt zijn, die is altijd weergegeven.



Figuur 18 Effect van maatregel 2 in en bij Schoonrewoerd



Figuur 19 Effect van maatregel 2 in Meerkerk

Door maatregel 2 veranderd er meer dan door maatregel 1. Er zijn meerdere verschijnselen zichtbaar.

Kleine omwegen

In Figuur 17, Figuur 18 en Figuur 19 is te zien dat verkeer in Schoonrewoerd, in Lexmond en binnen Vianen net een andere route krijgt door het verlagen van de snelheid. Dit effect is niet groot: het gaat om een aantal voertuigen maar de verandering van route is klein.

Kleine intensiteit in huidige situatie

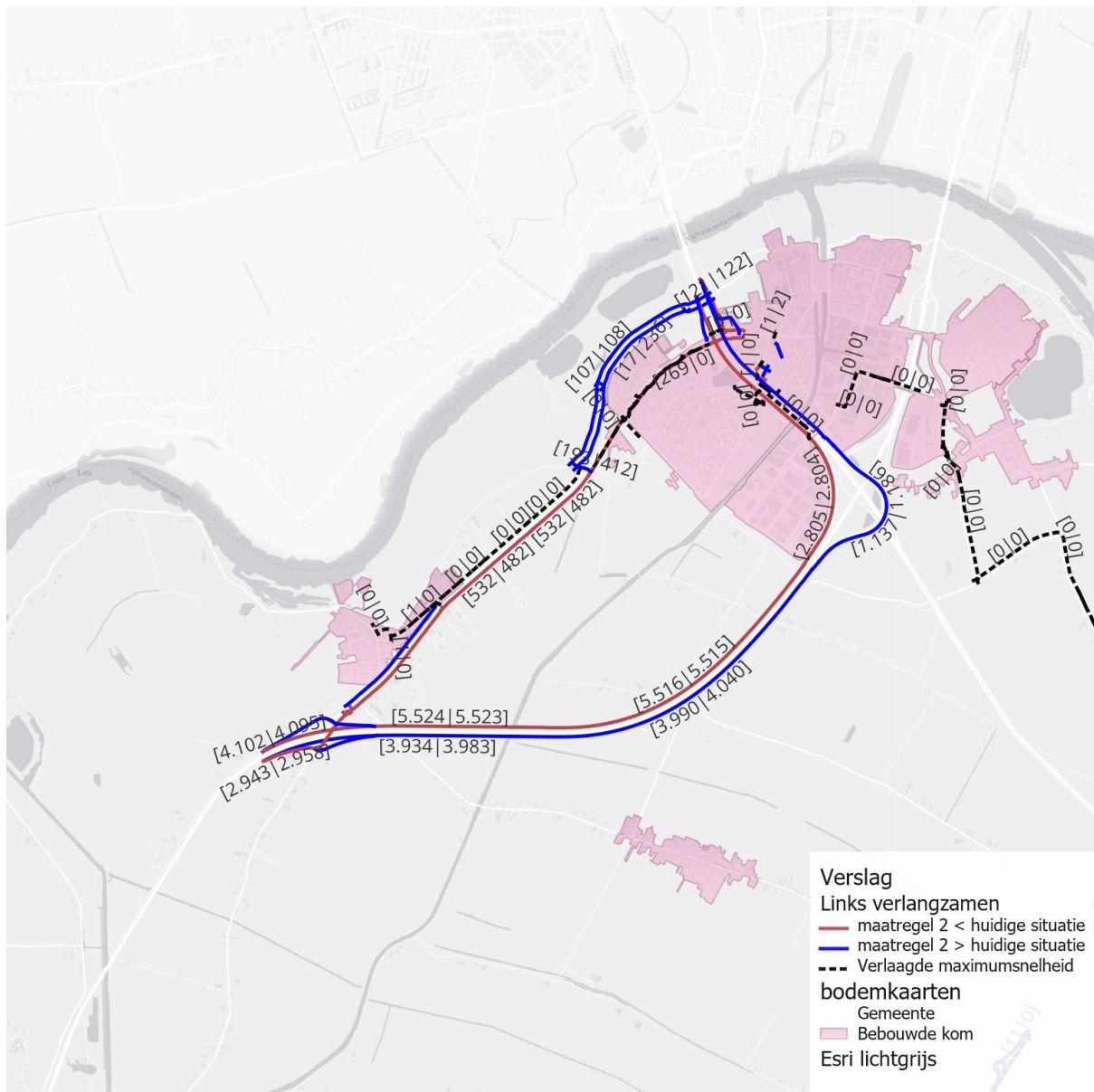
Op sommige plekken worden er wegvakken verlangzaamd in snelheid, die in de huidige situatie ook al een intensiteit kleiner dan 1 hadden. Dit gebeurt

- bij een parallelweg tussen Lexmond en Vianen
- tussen Vianen en een plek vlak bij de gemeentegrens bij Everdingen
- binnen Vianen

Ook dit effect is niet groot te noemen: in de huidige situatie was er erg weinig verkeer op die wegvakken, en na maatregel 2 is er nog iets minder verkeer op die wegvakken.

Benz-Bergweg

Bij de Benz-Bergweg neemt veel verkeer door maatregel 2 een andere route. Dit is zelfs minstens nagenoeg al het verkeer: de intensiteit op de Benz-Berg weg daalt naar afgerond 0. Dit is goed te zien in Figuur 20.



Figuur 20 Effect van maatregel 2 op en rondom de Benz-Bergweg

Dit is een opvallend resultaat: ondanks dat de weg niet wordt afgesloten, daalt de intensiteit in de richting waar de maximumsnelheid is verlaagd wel naar 0. Blijkbaar is er geen verkeer dat verplicht deze weg in die richting moet nemen, en wordt deze weg zo onaantrekkelijk dat hij niet meer gebruikt wordt.

De alternatieve routes die worden genomen gaan deels over de snelweg, en deels over andere kleine wegen, die minder in de bebouwde kom liggen. Dit is het effect waar op gehoopt werd: door maatregel 2 is er minder verkeer in de bebouwde kom.

6.3. Doelfunctiewaarden en interpretatie daarvan

Alle toedelingen

In Tabel 10 is een overzicht te zien van de doelfunctiewaarden van de huidige situatie en de verschillende toedelingen. In Bijlage V is een uitgebreider overzicht weergegeven, waar ook is

uitgesplitst in verschillende groepen verkeer. In beide tabellen is gebruik gemaakt van de doelfuncties uit paragraaf 5.5.

In Tabel 10 zijn de cellen met de kleinste doelfunctiewaarde groen gekleurd, en de cellen met de grootste doelfunctiewaarde zijn rood gekleurd. De groene cellen hebben dus de 'betere' functiewaarden: hoe kleiner de Totale Reistijd, de Totale Komtjd en de Kleinewegtijd, hoe beter.

Tabel 10 Vergelijking van resultaten per toedelingsmethode

Beschrijving	afkorting	Totale Reistijd	Totale Komtjd	Kleine wegtijd
Huidige situatie	ue	339362,5	21957,3	23497,3
Optimum met minimale reistijd	so	338218,3	22607,7	24089,2
Optimum met weinig sluipverkeer	so_antislui	339900,9	20023,1	21289,2
Optimum met gesloten wegvakken	so_linksweg	339900,8	20023,2	21289,6
Maatregel 1	ue_linksweg	339366,4	21954,4	23504,6
Maatregel 2	ue_langzamer	339278,4	21055,3	22521,0

Resultaten die voldoen aan de verwachtingen:

- De Totale Komtjd en de Kleinewegtijd zijn zowel na maatregel 1 als na maatregel 2 kleiner dan in de huidige situatie. Dat betekent dat door de voorgestelde maatregelen de Totale Komtjd en de Kleinewegtijd afnemen. Dit is naar verwachting en ook gewenst, want het doel was om de tijd in de bebouwde kom en de tijd op kleine wegen te verminderen.
- De Totale Reistijd is het laagste bij het systeemoptimum (het optimum met de minimale reistijd). Dit is naar verwachting, omdat er hier ook op geoptimaliseerd werd.
- De Totale Komtjd is het laagste bij het 'optimum met weinig sluipverkeer'. Ook dit is naar verwachting, omdat dit optimum hierop optimaliseerde.
- De doelfunctiewaarden na maatregel 1 verschillen weinig van de doelfunctiewaarden van de huidige situatie. Dit is naar verwachting, omdat in paragraaf 6.2 al bleek dat het afsluiten van de wegen weinig effect had op eht verkeer.

Opvallende resultaten:

- De Totale Reistijd is in de huidige situatie groter dan na maatregel 2. Er werd verwacht dat de totale reistijd iets zou toenemen maar de tijd in de bebouwde kom zou afnemen. Het feit dat de Totale Reistijd door maatregel 2 afneemt suggereert dat er in het netwerk sprake is van de Braess-paradox. Deze paradox is in hoofdstuk 4 ter sprake gekomen.
- De Totale Reistijd is bij het systeemoptimum (de situatie met de minimale totale reistijd) het laagste, terwijl hier de Totale Komtjd en de Kleinewegtijd juist het grootste zijn van allemaal. Dit is te verklaren: in het systeemoptimum krijgt een deel van de voertuigen een route die niet optimaal voor ze is, maar wel voordelig voor ander verkeer. Dit kan bijvoorbeeld een route zijn die de snelweg mijdt, zodat er op de snelweg minder file staat.

Gebruikersevenwichten

Het doel van dit hoofdstuk is om te bepalen welke van de maatregelen het effectiefste is. Om dit te bepalen, moet alleen worden gekeken naar de gebruikersevenwichts-toedelingen. Er zijn drie gebruikersevenwichts-toedelingen: de toedeling van de huidige situatie, de toedeling na maatregel 1, en de toedeling na maatregel 2.

Deze worden in Tabel 11 nader bestudeerd. Hierbij zijn de volgende groepen verkeersdeelnemers uitgesplitst: 'bestemmingsverkeer' is het verkeer dat begint of eindigt in een bebouwde kom,

‘doorgaand verkeer’ is het verkeer dat niet begint of eindigt in een bebouwde kom en ‘al het verkeer’ is al het verkeer samen.

In Tabel 11 is het procentuele verschil te zien tussen de huidige situatie en de twee doorgerekende nieuwe situaties. Hierbij zijn getallen kleiner dan -1 groen gekleurd. Er waren geen getallen groter dan 1.

Tabel 11 Procentueel verschil tussen de situaties zonder maatregel en de situaties met maatregel

Doelfunctie	Groep verkeer	Maatregel 1	Maatregel 2
Totale Reistijd	bestemmingsverkeer	0,00%	-0,32%
Totale Komtijd	bestemmingsverkeer	-0,14%	-1,00%
Kleinewegtijd	bestemmingsverkeer	-0,18%	-0,95%
Totale Reistijd	doorgaand verkeer	0,00%	0,02%
Totale Komtijd	doorgaand verkeer	0,19%	-8,98%
Kleinewegtijd	doorgaand verkeer	0,35%	-9,04%
Totale Reistijd	al het verkeer	0,00%	-0,02%
Totale Komtijd	al het verkeer	-0,01%	-4,11%
Kleinewegtijd	al het verkeer	0,03%	-4,16%

Wat opvalt in Tabel 11 is dat de doelfunctiewaarden bij maatregel 1 met minder dan een procent veranderen. Het weghalen van wegvakken blijkt dus weinig effect te hebben, iets wat ook al bleek in paragraaf 6.1 en uit Tabel 10.

Maatregel 2 (het verlagen van de maximumsnelheid op wegvakken) heeft een groter effect op de functiewaarden: de reistijd in de bebouwde kom en de reistijd op kleine wegen dalen beide met meer dan 4% ten opzichte van de huidige situatie.

Uit de uitsplitsing in doorgaand verkeer en lokaal verkeer blijkt dat het doorgaande verkeer zelfs een daling van de Totale Komtijd en van de Kleinewegtijd heeft van meer dan 8%. Het bestemmingsverkeer heeft een daling van de reistijd in de bebouwde kom van 1%. De enige waarde die toeneemt door maatregel 2 is de totale reistijd van het doorgaande verkeer, maar hier gaat het om slechts 0.02%.

Met deze vergelijking wordt duidelijk dat het verlagen van de maximumsnelheideen betere maatregel is dan het sluiten van wegvakken voor het verminderen van sluipverkeer.

6.4. Invloed op de ochtendspits

Uit de voorgaande paragrafen in dit hoofdstuk blijkt dat in het tijdslot van 16:00 tot 17:00 het verlangsamen van wegvakken een goede maatregel is om sluipverkeer tegen te gaan.

Nu moet nog onderzocht worden of de maximumsnelheid de hele dag omlaag kan, of dat dat negatieve effecten zou geven op de hoeveelheid sluipverkeer. In dat laatste geval zou een onderbord kunnen worden gebruikt. Hiermee kan worden gezorgd dat een maximumsnelheid om bepaalde tijden anders is, dit bleek uit hoofdstuk 2. Daarom wordt nagegaan of het verlangsamen van die wegvakken ook een positief effect heeft op de hoeveelheid sluipverkeer op het drukste tijdslot in de ochtendpits: tussen 7:00 uur en 8:00 uur. De functiewaarden van het gebruikersevenwicht voor en na de maatregelen is weergegeven in Tabel 12, evenals het procentuele verschil hiertussen.

Tabel 12 Effect van maatregel op ochtendspits

Doelfunctie	Groep verkeer	Huidige situatie	Toekomstige situatie	Procentueel verschil
Totale Reistijd	bestemmingsverkeer	13133,72	13034,46	-0,76%
Totale Komtijd	bestemmingsverkeer	5293,45	5196,52	-1,83%
Kleinewegtijd	bestemmingsverkeer	5507,75	5410,82	-1,76%

Totale Reistijd	doorgaand verkeer	224554,61	225341,84	0,35%
Totale Komtijd	doorgaand verkeer	3978,09	3031,80	-23,79%
Kleinewegtijd	doorgaand verkeer	4581,10	3485,38	-23,92%
Totale Reistijd	al het verkeer	237688,34	238376,30	0,29%
Totale Komtijd	al het verkeer	9271,54	8228,32	-11,25%
Kleinewegtijd	al het verkeer	10088,85	8896,20	-11,82%

Uit Tabel 12 blijkt dat de verkeersmaatregelen in de ochtendspits een groter positief effect hebben dan in de avondspits: de Totale Komtijd en de Kleinewegtijd van het doorgaande verkeer (beide een maat voor de hoeveelheid sluipverkeer) dalen in de ochtendspits met meer dan 23%. Dit is niet naar verwachting, omdat de maatregelen juist zijn genomen om sluipverkeer in de avondspits te voorkomen. Het verschil zou kunnen komen door verschil in het gebruik van bebouwde kommen: wellicht gebruikt het verkeer in de ochtendspits precies de bebouwde kommen waar er maatregelen genomen zijn, terwijl het verkeer in de avondspits ook veel gebruikmaakte van andere kommen.

Als er een uitsplitsing wordt gemaakt tussen bestemmings- en doorgaand verkeer, dan blijkt dat de Kleinewegtijd en de Totale Komtijd vooral afnemen bij het doorgaande verkeer. Dit wordt verklaard doordat het doorgaande verkeer waarschijnlijk meer uitwijkmogelijkheden heeft, terwijl het bestemmingsverkeer toch in de bebouwde kom moet zijn, en hier door de verlaging van de maximumsnelheid misschien zelfs langer is.

De Totale Reistijd neemt toe, ook bij het doorgaande verkeer. Dit is anders dan bij de avondspits, maar niet onverwacht. Zoals in hoofdstuk 1 al werd geschreven mag het verminderen van sluipverkeer zorgen voor een groei van de totale reistijd, zolang die groei maar niet te groot is. In dit geval is de groei minder dan 1%.

6.5. Maatregelen in de praktijk

Verkeersborden

Deze scriptie gaat over maatregelen met verkeersborden. Nu er een aantal wegen zijn geselecteerd die een lagere maximumsnelheid moeten krijgen, moet er nog een laatste stap worden gezet om dit weer om te zetten in verkeersborden. Ten eerste moet aan het begin van de wegen die een kleinere maximumsnelheid krijgen een verkeersbord worden neergezet met een nieuwe maximumsnelheid. Ten tweede moet aan het eind van die wegen een verkeersbord worden neergezet met de 'oude' maximumsnelheid.

Maximumsnelheid verschilt per richting van de weg

Een discussiepunt is dat de maximumsnelheid op wegen nu 'een kant op' is veranderd. Het is onlogisch als een weg de ene kant op de ene maximumsnelheid heeft, en de andere kant op de andere maximumsnelheid. Toch is gekozen voor deze aanpak. Dit heeft ermee te maken dat het voor de optima uit hoofdstuk 5 niet binnen de beschikbare tijd zou lukken om te zorgen dat de maximumsnelheid twee kanten op gelijk blijft. Dan was er nog een optie om bij de selectie van de wegvakken die veranderen, handmatig te corrigeren, bijvoorbeeld door:

- Een wegvak in beide richtingen te veranderen, ook als hij maar één kant op geselecteerd is.
- Een wegvak alleen in snelheid te veranderen, als hij in beide richtingen geselecteerd is.

Beide situaties zullen waarschijnlijk zorgen voor een verslechtering van de functiewaarden.

Een vraag die dan nog open ligt is of bij het bepalen van de functiewaarden van de 'optima' ook eerst de maximumsnelheid in beide richtingen veranderd moeten worden.

- Als dat gebeurt, zal het systeemoptimum minder goed uit de verf komen.
- Als dat niet gebeurt, dan zijn het optimum met weinig sluipverkeer en het gebruikersevenwicht na maatregel 2 minder goed te vergelijken met elkaar.

Met deze afwegingen is gekozen om toe te staan dat de maximumsnelheid in de ene richting anders is dan in de andere richting, ondanks dat dit in de praktijk niet gebruikelijk is.

6.6. Uitgangspunten

In hoofdstuk 4 zijn er in de conclusie meerdere uitgangspunten geformuleerd waaraan is voldaan:

- Zowel het sluiten van wegen als het verlagen van de maximumsnelheid is doorgerekend.
- Voor het bepalen van de reistijd is de BPR-functie gebruikt.
- Voor het bepalen van de snelste route is er bij het gebruikersevenwicht gebruik gemaakt van het Dijkstra-algoritme. Bij de andere toedelingen is dit niet gedaan, maar hier was de insteek dan ook niet om elke verkeersdeelnemer de snelste route te geven.
- Er is geen stochastisch model gemaakt
- Er is een tweelaags model gemaakt: eerst worden er wegwakken gekozen die aangepast worden, dit is de 'leider-laag'. Vervolgens wordt onderzocht wat het effect is van die maatregelen op de tweede laag: de 'volger-laag'.
- De verkeersmaatregel 'eenrichtingsverkeer instellen' is niet meegenomen
- De verkeersmaatregel 'sluiten wegen' is wel gemodelleerd, net als de verkeersmaatregel 'verlagen maximumsnelheid'. Bij het modelleren van deze maatregelen is de gekozen aanpak uit hoofdstuk 5 gevolgd.

Onderbord 'uitgezonderd bestemmingsverkeer'

In hoofdstuk 4 is ook gesproken over het onderbord 'uitgezonderd bestemmingsverkeer' als manier om te zorgen dat alle bestemmingen bereikbaar blijven. Dit onderbord is niet gebruikt, maar er is wel gezorgd dat alle bestemmingen die in de avondspits bezocht worden bereikbaar blijven, door de manier waarop het linksluit-optimum geïmplementeerd is. Hierdoor zullen de meestgebruikte bestemmingen bereikbaar blijven. Ook is de uiteindelijk gekozen maatregel het verlagen van de maximumsnelheid, en hierdoor blijven alle plekken sowieso bereikbaar. Daarom is, ondanks dat dit onderbord niet is gebruikt, een goed model gemaakt.

6.7. Conclusie

Het model dat verkeer verdeelt over de wegen sluit aan bij de daadwerkelijke doorstroom van het verkeer. Dit blijkt uit de vergelijking tussen het gebruikersevenwicht (een verdeling van het verkeer op basis van de theorie) en de praktijksituatie (de gemeten waarden in de Floating Car Data).

Het effect van de verkeersmaatregelen is onderzocht door de verdeling van het verkeer voor- en na de maatregelen met elkaar te vergelijken. De efficiëntie van de twee gesimuleerde maatregelen is beoordeeld door te kijken naar de mate waarin het sluipverkeer afneemt door de aanpassing, in verhouding tot de toename van reistijd voor alle verkeersdeelnemers.

Het verminderen van de snelheid van wegen is een betere maatregel tegen sluipverkeer dan het sluiten van wegen. Daarom wordt deze maatregel geadviseerd.

Als de wegen die een kleinere maximumsnelheid moeten krijgen worden bepaald met de vervoersvraag in de avondspits, dan verminderd zowel in de ochtend- als in de avondspits de totale reistijd in de bebouwde kom. Dit geldt ook als alleen wordt gekeken naar doorgaand verkeer. Dit betekent dat zowel in de ochtend- als in de avondspits de hoeveelheid sluipverkeer afneemt door de verkeersmaatregel. Hier staat bij de ochtendspits wel een kleine stijging van de totale reistijd tegenover, deze stijging is minder dan een procent.

De verwachting is dat de in dit onderzoek gevonden verkeersmaatregel (het verminderen van de maximumsnelheid op de geselecteerde wegen) een meetbaar en realistisch effect heeft in de echte wereld.

7. Conclusies

In dit onderzoek is antwoord gegeven op de deelvragen uit de inleiding (hoofdstuk 1). Deze deelvragen worden een voor een langsgelopen. Daarna wordt ingegaan op de voorgestelde maatregelen en het effect van die maatregelen.

Deelvraag 1: Wat is sluipverkeer, en waar in provincie Utrecht is het op dit moment een probleem?

Sluipverkeer is doorgaand verkeer dat over een weg gaat van een lagere orde dan nodig. In deze scriptie wordt de definitie van Van De Hoef en Kuijten (1979) gebruikt. Het belangrijkste verschil met andere definities is dat er bij sluipverkeer geen sprake hoeft te zijn van overlast. Bij het gebruik van het woord 'sluipweg' moet er wel sprake zijn van overlast.

In provincie Utrecht is er op meerdere plekken sprake (geweest) van sluipverkeer door dorpskernen: in gemeente Utrecht, gemeente Woudenberg en gemeente Vijfheerenlanden. In dit onderzoek wordt ingegaan op gemeente Vijfheerenlanden.

Deelvraag 2: Welke verkeersborden worden in dit onderzoek meegenomen?

- In dit onderzoek worden verkeersborden meegenomen voor maximumsnelheid, eenrichtingsverkeer en wegafsluitingen. Verkeersborden met 'dimensiebeperkingen' worden niet meegenomen in dit onderzoek. Het verkeersbord 'verboden voor vrachtverkeer' is een wens en geen eis in dit onderzoek, omdat vrachtverkeer ook met een 'normaal verbodsbord', kan worden uitgesloten, en omdat verkeersborden voor vrachtverkeer relatief weinig worden gebruikt.
- Met het onderbord 'uitgezonderd bestemmingsverkeer' kan worden gezorgd dat bestemmingen bereikbaar blijven als er borden voor eenrichtingsverkeer en wegafsluitingen worden neergezet. Ook kan met een onderbord een weg worden afgesloten om bepaalde tijden, of een andere maximumsnelheid krijgen om bepaalde tijden.

Deelvraag 3: Welke data is er beschikbaar om te gebruiken in dit onderzoek?

Er is data beschikbaar over wegkenmerken en over reisbewegingen. De data over reisbewegingen moet gewogen worden, omdat bepaalde categorieën voertuigen oververtegenwoordigd zijn en omdat niet alle voertuigen in de data zitten.

Deelvraag 4: Welke methodieken worden in de literatuur gebruikt om de maatregelen te plannen die horen bij de verkeersborden in deelvraag 2?

- Sluiten wegen
 - In het vervolg van dit onderzoek wordt, net als in het artikel van Ma et al. (2018), bij het bepalen welke wegen er gesloten moeten worden, een verkeerstoedeling volgens een optimum gemaakt.
 - Bij het sluiten van wegen moet worden gezorgd dat alle bestemmingen bereikbaar blijven, bijvoorbeeld met het onderbord 'uitgezonderd bestemmingsverkeer'.
- Eenrichtingsverkeer
 - De verkeersmaatregel 'eenrichtingsverkeer instellen' kan meestal worden gemodelleerd met een model voor het sluiten van wegen. Daarom wordt deze verkeersmaatregel niet meegenomen in het vervolg van dit onderzoek.
- Verlagen maximumsnelheid
 - Door de maximumsnelheid op een sluipweg te verlagen wordt de reistijd langer, waardoor mensen en verkeersmodellen minder snel die sluipweg zullen nemen.
 - Om te bepalen welke wegen onaantrekkelijker gemaakt moeten worden, kan worden gekeken naar het verschil tussen een optimale situatie (bijvoorbeeld het systeemoptimum) en de huidige situatie (het gebruikersevenwicht). Wegen die in de optimale situatie veel minder gebruikt worden dan in de huidige situatie, zijn

wegvakken die 'ontmoedigd' zouden moeten worden door het verlagen van de maximumsnelheid.

Deelvraag 5: Hoe zijn die methodieken te combineren tot een model dat geschikt is voor dit onderzoek?

De eerste stap in het onderzoek is het maken van een tabel met informatie over wegvakken, en een tabel met informatie over de vervoersvraag. Vervolgens wordt de verkeerstoedeling in de huidige situatie berekend. Daarna worden verschillende verkeers-toedelingsmodellen geïmplementeerd om te bepalen welke wegvakken er worden afgesloten en bij welke wegvakken de maximumsnelheid wordt verminderd. Vervolgens wordt er met de nieuwe wegvakken-tabellen een nieuwe gebruikersevenwichts-toedeling gedaan. Er zijn dan drie gebruikersevenwichts-toedelingen: die van de huidige situatie, die van de situatie na het afsluiten van wegvakken, en die van het verminderen van de maximumsnelheid van wegvakken. Deze drie toedelingen gaan worden vergeleken op basis van drie doelfuncties: de totale reistijd, de totale reistijd in de bebouwde kom, en de totale reistijd op kleine wegen.

De hoofdvraag in dit onderzoek is:

Met welke maatregelen, die in te stellen zijn met verkeersborden, wordt sluipverkeer in dorpskernen zoveel mogelijk voorkomen, zonder dat voertuigen hierdoor een onacceptabel langere reistijd krijgen?

In het onderzoek zijn twee maatregelen onderzocht om sluipverkeer te verminderen: het afsluiten van wegvakken en het verlagen van de maximumsnelheid op wegvakken. Uit het onderzoek is gebleken dat het verminderen van de maximumsnelheid op wegvakken het grootste positieve effect had op de hoeveelheid sluipverkeer (gemeten in het totaal aantal minuten dat doorgaand verkeer in de bebouwde kom was, opgeteld voor elk voertuig). Door het verminderen van de snelheid op wegvakken die zijn geselecteerd met de methodiek uit deelvraag 5, neemt de hoeveelheid sluipverkeer in dorpskernen (oftewel in de bebouwde kom) af. Dit geldt zowel voor de ochtend- als voor de avondspits. De totale reistijd ten opzichte van de huidige situatie neemt hierbij toe, maar dit is met minder dan een procent ten opzichte van de huidige situatie. Voertuigen hebben dus geen onacceptabel langere reistijd.

Daarom kan worden geconcludeerd dat het verlagen van de maximumsnelheid van wegvakken die geselecteerd zijn met de methode uit deelvraag 5 een positief effect heeft op de hoeveelheid sluipverkeer in dorpskernen in gemeente Vijfheerenlanden. De reistijd blijkt acceptabel. Daarmee vormt deze maatregel de aanbevolen maatregel.

8. Discussie & aanbevelingen

8.1. Wegvakken

Maximumsnelheid gelijk houden in beide richtingen van een weg

De maatregel die het beste blijkt te werken bij het verminderen van sluipverkeer is het verlagen van de maximumsnelheid. Er is aangegeven dat het gebruikelijk is dat de maximumsnelheid in beide richtingen van de weg hetzelfde is. De eerste aanbeveling is dan ook om te onderzoeken wat er gebeurt als de maximumsnelheid van de wegvakken in beide richtingen omlaag gaat. Hierbij moet specifiek worden gelet op wegvakken die maar in een richting in de tabel staan: meestal zal er dan een ander wegvak zijn dat in werkelijkheid wordt gezien als 'dezelfde weg', maar die wel de andere richting op loopt. Ook bij dat wegvak moet dan de maximumsnelheid worden verlaagd.

Kenmerken van wegvakken bepalen

Er bestaan wegen waar landbouwverkeer is toegestaan, en wegen waar landbouwverkeer niet is toegestaan. Hier hangen verschillende parameters mee samen die gebruikt worden bij het berekenen van de reistijd, zoals de capaciteit van een weg. Die parameters hangen soms ook af van het wel of niet in de bebouwde kom liggen van een weg. Door deze informatie mee te nemen, kan het model nog nauwkeuriger gemaakt worden.

De kenmerken van wegvakken verschillen 'in de echte wereld' soms afhankelijk van het tijdstip: zo zijn er spitsstroken, waardoor de capaciteit anders is om bepaalde tijdstippen. Ook de maximumsnelheid is op Nederlandse snelwegen overdag vaak anders dan in de avond en in de vroege ochtend. Door met deze wisseling van kenmerken rekening te houden kan een nauwkeuriger model gemaakt worden. Zolang alleen spitsperiodes meegenomen worden, zal het afhankelijk maken van wegkenmerken van de tijd geen effect hebben.

8.2. Voertuig-categorieën

Vrachtverkeer: routes en maximumsnelheid

Uit hoofdstuk 3 bleek dat er verkeersborden bestaan die alleen invloed hebben op vrachtverkeer. Dit verkeer zal daarom soms een andere route moeten nemen dan autoverkeer. Daarnaast mag vrachtverkeer niet altijd de maximumsnelheid van een weg rijden. In dit onderzoek zijn die verschillen en beperkingen in snelheid en routes niet meegenomen. Een aanbeveling is om in vervolgonderzoek vrachtwagens los van de andere voertuigen te modelleren. Dan zouden vrachtwagens in de doelfunctie ook zwaarder meegerekend kunnen worden, aangezien deze voertuigen een hinderlijke vorm van sluipverkeer zijn. In hoofdstuk 2 bleek bijvoorbeeld dat vrachtwagens trillingen veroorzaken.

De eerste stap bij het implementeren van deze aanbeveling, is het zorgen dat bij het maken van de vervoersvraag een uitsplitsing blijft bestaan tussen voertuigsoorten. Omdat de vervoersvraag-tabel hierdoor meer rijen zal tellen, moet de opdrachtgever bij deze aanbeveling rekening houden met een aanzienlijke toename in rekentijd.

Capaciteit & intensiteit berekenen in personenauto-equivalenten

De capaciteiten die nu worden gebruikt staan in 'personenauto-equivalenten': hierbij tellen vrachtwagens zwaarder personenauto's. In dit onderzoek zijn de intensiteiten en capaciteiten alleen bepaald aan de hand van het aantal voertuigen. In toekomstig onderzoek kan bij het gebruik van capaciteiten ook rekening worden met het soort voertuig. De intensiteiten zouden dan ook moeten worden berekend in personenauto-equivalenten. Hierdoor wordt het model iets nauwkeuriger. Dit zal geen groot verschil maken, want de meeste voertuigen op de weg zijn personenauto's, en personenauto's houden bij personenauto-equivalenten gewing 1. Daarom heeft deze aanbeveling minder prioriteit dan de andere aanbevelingen in dit hoofdstuk.

8.3. Herkomsten en bestemmingen

Bestemmingen bereikbaar houden, bijvoorbeeld met onderbord

Een van de uitgangspunten was dat er een verkeersbord zou kunnen komen met als onderbord 'uitgezonderd bestemmingsverkeer'. Dit is nog niet geïmplementeerd. Wel wordt gezorgd dat de herkomsten en bestemmingen uit het onderzochte tijdslot bereikbaar blijven, en dat is één van de drukste tijdsloten. Daarom zullen de meeste herkomsten en bestemmingen bereikbaar blijven, maar het kan zijn dat er herkomsten en bestemmingen die alleen in andere tijdsloten gebruikt worden, onbereikbaar worden door het afsluiten van wegvakken.

Als de opdrachtgever het model wil uitbreiden zodat er ook onderborden met 'uitgezonderd bestemmingsverkeer' worden geplaatst, dan moet rekening worden gehouden met welk verkeer welke bebouwde kom gebruikt, want het is niet zo dat verkeer dat in de ene hoek van Vijfheerenlanden moet zijn, in een andere hoek over een weg met 'uitgezonderd bestemmingsverkeer' mag rijden.

Kortom: het modelleren van onderborden is niet strikt noodzakelijk om het model te kunnen gebruiken om wegen af te sluiten. Voor het verlagen van de maximumsnelheden waren de onderborden niet noodzakelijk, omdat bij het verlagen van de maximumsnelheden bestemmingen bereikbaar blijven.

Als de opdrachtgever deze onderborden toch wil modelleren, dan mag hierbij niet al het bestemmingsverkeer gebruik maken van het onderbord 'uitgezonderd bestemmingsverkeer'.

Groepering van herkomsten en bestemmingen

Door de groepering van herkomsten en bestemmingen krijgen herkomsten en bestemmingen vanuit een bebouwde kom allemaal hetzelfde herkomst- of bestemmingspunt. Door deze groepering zijn er minder herkomsten en bestemmingen. Hierdoor kan het zijn dat door het afsluiten van de wegen leidt tot onbereikbaarheid van herkomsten- of bestemmingen. Dit zou, naast het plaatsen van onderborden, kunnen worden voorkomen door niet te groeperen op herkomsten en bestemmingen. Het nadeel van deze aanpassing is dat hierdoor de rekentijd groter wordt, en het model lastiger te interpreteren wordt. Daarom wordt deze aanpassing niet aanbevolen aan de opdrachtgever.

8.4. Overig

Ander gebied kiezen

Dit onderzoek is uitgevoerd binnen gemeente Vijfheerenlanden. In de basis is dit onderzoek goed herhaalbaar voor een andere gemeente. Het is interessant voor toekomstig onderzoek om te vergelijken of bij andere gemeenten ook de oplossing van de verlaging van de maximumsnelheid de beste resultaten geeft, of dat daar een andere uitkomst is. Aan de opdrachtgever wordt aanbevolen om, als een ander gebied zou worden gekozen om het onderzoek te herhalen, weer een gemeente te kiezen. Bij de keuze voor bijvoorbeeld een provincie zal het model een langere rekentijd krijgen, en kan het model minder goed worden gecontroleerd door de vele herkomsten, bestemmingen en routes.

Rekening houden met andere tijdsloten

In dit onderzoek zijn alleen een uur van de avondspits en een uur van de ochtendspits meegenomen. Hierdoor wordt dus het grootste deel van de dag niet meegenomen. Op rustigere tijdstippen kan het dat de maatregelen een negatief effect hebben op de hoeveelheid verkeer. Op het moment dat er vooral bestemmingsverkeer is op de wegen waar maatregelen worden genomen, dan zal dit verkeer moeten omrijden of langzamer rijden. Daarom moet bij deze onderzoeksopzet altijd worden nagegaan wat het effect is van de verkeersmaatregel op andere tijdsloten. In dit onderzoek is dit al gedaan voor de ochtendspits.

Bronnenlijst

- Amini, S., Ameli, M., Winzenrieth, B., Bogenberger, K., Busch, F., & Leclercq, L. (2022). A BRAESS PARADOX EXPLOITATION FRAMEWORK FOR OPTIMAL TRAFFIC 1 BANNING STRATEGY 2. In *101th Annual Meeting Transportation Research Board*. <https://hal.science/hal-03680834/document>
- Başkan, Ö., & Ozan, C. (2018). Determining optimum configuration of one-way and two-way streets using shortest path travel costs based on results of traffic assignment. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(6), 1087-1092. <http://dx.doi.org/10.5505/pajes.2017.21208>
- Bliemer, M. C. J. (2007). Braess paradox : extra wegen, meer congestie! *Stator*, 8(3), 14-17. Geraadpleegd op 30 november 2023, van https://www.vvsor.nl/wp-content/uploads/2018/01/STaTOR_2007-3_totaal.pdf
- Bunschoten & Kwant (2021, mei). Verkeersmodel Noord-Holland Zuid 3.0 – Actualisatie verkeersmodel. Goudappel. Geraadpleegd op 16 januari 2024, van <https://www.commissiemer.nl/projectdocumenten/00009257.pdf>
- CBS (2023). Verkeersprestaties motorvoerguiten; kilometers, voertuigsoort, grondgebied. [Dataset]. Geraadpleegd op 14 maart 2024, van <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/85395NED/table?dl=9D860>
- Champion, K. (z.d.). *CSE 373: Data Structures and Algorithms - Lecture 17: BFS, DFS, Dijkstra*. University of Washington. [Slides]. Geraadpleegd op 12 december 2023, van <https://courses.cs.washington.edu/courses/cse373/21sp/lectures/lecture17.pdf>
- Data.overheid.nl (z.d.). *Bebouwde kommen onder de wegenwet*. <https://data.overheid.nl/dataset/7750ea06-f084-4f67-9bb5-aac409328de7>
- De Baets, K., Vlassenroot, S., Boussauw, K., Lauwers, D., Allaert, G., & De Maeyer, P. (2014). Route choice and residential environment: introducing liveability requirements in navigation systems in Flanders. *Journal of Transport Geography*, 37, 19-27. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.04.005>
- De Mol, J., Defreyne, P., Semanjski, I., Gautama, S., Gillis, D., & Lopez, A. J. (2017, april). VEBIMOBEO zoekt niet kortste maar meest duurzame route: verkeersbordendatabank blijkt goede basis voor ontwikkeling duurzame routenavigatie. *VERKEERSPECIALIST*, 235, 6-9. Geraadpleegd op 30 november 2023, van <https://biblio.ugent.be/publication/8517386/file/8517388.pdf>
- Drezner, Z., & Salhi, S. (2002). Using hybrid metaheuristics for the one-way and two-way network design problem. *Naval Research Logistics (NRL)*, 49(5), 449-463. <http://dx.doi.org/10.1002/nav.10026>
- Drezner, Z., & Wesolowsky, G. O. (1997). Selecting an optimum configuration of one-way and two-way routes. *Transportation Science*, 31(4), 386-394. <https://doi.org/10.1287/trsc.31.4.386>
- Farahani, R. Z., Miandoabchi, E., Szeto, W. Y., & Rashidi, H. (2013). A review of urban transportation network design problems. *European journal of operational research*, 229(2), 281-302. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.01.001>
- Fokkema, J., Harms, I. M., & Kuiken, M. J. Analyse nadelige effecten navigatiesystemen op routekeuze: gebruik en misbruik van wegen, deel 2. Rijkswaterstaat. <https://open.rijkswaterstaat.nl/>

[publish/pages/134845/analyse_nadelige_effecten_navigatiesystemen_op_routekeuze_gebruik_en_misbruik_van_wegen_deel_2.pdf](https://www.nieuwsoord.nl/publish/pages/134845/analyse_nadelige_effecten_navigatiesystemen_op_routekeuze_gebruik_en_misbruik_van_wegen_deel_2.pdf)

Fröhlich, S. [@SjorsFrohlich]. (2023, 17 november). *Eindelijk. Alles klaar om het sluipverkeer aan te pakken. In de spits bij Vianen eraf en dan bij Lexmond of Meerkerk de snelweg weer op om de file te omzeilen? Dat wordt verboden. Hoe het werkt en hoe inwoners wel gewoon naar huis kunnen rijden zie je in dit filmpje* 📺. [Tweet]. Twitter. Geraadpleegd op 19 december 2023, van <https://twitter.com/SjorsFrohlich/status/1725429316635283512>

Gazet van Antwerpen (2019, 25 september). *Ook last van sluipverkeer? Breng het hier mee in kaart*. Geraadpleegd op 13 november 2023, van https://www.gva.be/cnt/dmf20190924_04624737

Geijsman, C. (2023, 20 november). *Inwoners Lexmond trillen uit hun bed van het verkeer: 'je denkt soms echt dat het dak naar beneden komt'*. RTV Utrecht. Geraadpleegd op 24 november 2023, van <https://www.rtvutrecht.nl/nieuws/3661442>

Geobasisregistraties (z.d). *Basisregistratie Topografie*. Geraadpleegd op 27 november 2023, van <https://www.geobasisregistraties.nl/basisregistraties/topografie>

Goudappel. (2021, maart). *Kwantitatieve effectbepaling Smart Mobility*. Geraadpleegd op 22 november 2023, van https://www.noord-holland.nl/Onderwerpen/Verkeer_vervoer/Smart_Mobility/Documenten/Rapport_kwantitatieve_effectbepaling_Focus_Smart_Mobility.pdf

Kadaster (z.d. - a). *Bebouwde Kom*. Geraadpleegd op 1 december 2023, van <https://catalogus.kadaster.nl/brt/nl/page/BebouwdeKom>

Kadaster (z.d. - b). *Plaats*. Geraadpleegd op 27 november 2023, van <https://catalogus.kadaster.nl/brt/nl/page/Plaats>

Kerkman, K. E., Arentze, T. A., Borgers, A. W. J., & Kemperman, A. D. A. M. (2012). Car drivers' compliance with route advice and willingness to choose socially desirable routes. *Transportation Research Record*, 2322, 102-109. <https://doi.org/10.3141/2322-11>

Koop, P. (2019, 21 november). *Snel vanuit het Utrechtse centrum naar de snelweg? Dat wordt voortaan omrijden*. AD. Geraadpleegd op 19 december 2023, van <https://www.gelderlander.nl/utrecht/snel-vanuit-het-utrechtse-centrum-naar-de-snelweg-dat-wordt-voortaan-omrijden~a97c20ea/>

Li, D., Miwa, T., & Morikawa, T. (2013). Dynamic route choice behavior analysis considering en route learning and choices. *Transportation research record*, 2383(1), 1-9. <https://doi.org/10.3141/2383-01>

Ma, J., Li, D., Cheng, L., Lou, X., Sun, C., & Tang, W. (2018). Link restriction: Methods of testing and avoiding braess paradox in networks considering traffic demands. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 144(2), 04017076. <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000111>

Nationaalwegenbestand.nl (2023, 30 mei). *Gebruikersinformatie Wegkenmerkendatabase (WKD) – Versie 1.5*. Geraadpleegd op 7 maart 2024, van https://www.nationaalwegenbestand.nl/application/files/8816/8553/2911/Gebruikersinformatie_Wegkenmerkendatabase_WKD_1.5_30-05-2023.pdf

Nationaalwegenbestand.nl (2023, 7 juli). *Functional Road Class aangepast*. Geraadpleegd op 28 november 2023, van <https://www.nationaalwegenbestand.nl/nieuws/functional-road-class-aangepast>

- NDW (z.d.-a). Rekenregels. Geraadpleegd op 20 december 2023, van <https://docs.ndw.nu/handleidingen/DEXTER/rekenregels/>
- NDW (z.d.-b). Profielen verkeersgegevens. Geraadpleegd op 21 december 2023, van <https://docs.ndw.nu/dataformaten/datex2-v2.3/verkeersgegevens>
- Rijkswaterstaat. (z.d). Smart Mobility. Geraadpleegd op 22 november 2023, van <https://www.rijkswaterstaat.nl/leefomgeving/duurzame-mobiliteit/smart-mobility>
- Rottiers, K., Dotremont, R., Keppens, M., Gillis, D., Hessels, L. (2007). Sluipverkeer in de Zuidooststrand van Antwerpen: Eindrapport versie 4.0a. Geraadpleegd op 22 december 2023, van <https://adoc.pub/download/sluipverkeer-in-de-zuidooststrand-van-antwerpen.html>
- RTV Utrecht. (2023, 15 mei). Bewoners Utrechtse wijk ergeren zich groen en geel aan sluipverkeer: 'Dit werkt niet'. Geraadpleegd op 19 december 2023, van <https://www.rtvutrecht.nl/nieuws/3580968>
- Shanmugasundaram, N., Sushita, K., Kumar, S. P., & Ganesh, E. N. (2019). Genetic algorithm-based road network design for optimising the vehicle travel distance. *International Journal of Vehicle Information and Communication Systems*, 4(4), 344-354. <https://doi.org/10.1504/IJVICS.2019.103931>
- Smeets, I. (2014). De verassende vertraging. In W. Schilders (Red), *Succesformules – Toepassingen van Wiskunde* (pp. 18-19). Geraadpleegd op 11 maart 2024, van http://www.platformwiskunde.nl/wp-content/uploads/2016/10/PWNsuccesformules_LowRes.pdf
- Van de Hoef, H.A., Kuijten, M.J.C. (1979). *Sluipverkeer op wegen buiten de bebouwde kom*. Verkeerskunde 1979, NR. 1, pp. 26-31. Geraadpleegd op 13 november 2023, van <https://www.verkeerskunde.nl/Uploads/2011/5/VK-1979-1-pag-26-31beter.pdf>
- Van den Hoven, B. (2019). *Studie toenemend verkeer gemeente Woudenberg*. Geraadpleegd op 15 december 2023, van <https://gemeentebestuur.woudenberg.nl/Vergaderingen/Raadscommissie/2020/07-januari/19:30/05c-Rapport-onderzoek-toenemend-verkeer-gemeente-Woudenberg-1.pdf>
- Van Nes, R. (2013). CIE4801 Transportation and spatial modelling – Congested assignment. [slides]. Geraadpleegd op 11 december 2023, van <https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Lecture7.pdf>
- Verkeersbordenoverzicht.nl (2023, november). *Welke verkeersborden, wegbebakening en bewegwijzingen zijn er in Nederland?* Geraadpleegd op 29 november 2023, van <https://verkeersbordenoverzicht.nl/>
- Vijfheerenlanden.nl (2023, november). Aanpak sluipverkeer Vianen – Lexmond. Geraadpleegd op 15 december 2023, van https://www.vijfheerenlanden.nl/Inwoners/Overzicht_Inwoners/Inrijverboden_sluipverkeer_Vianen_Lexmond
- Zhou, X., Yang, Z., Zhang, W., Tian, X., & Bing, Q. (2016). Urban link travel time estimation based on low frequency probe vehicle data. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/7348705>

Bijlage I Datakolommen

NDW – wegvakken

Informatie verkregen van nationaalwegenbestand.nl (2023).

kolom	type	opbouw of mogelijke waarden	Beschrijving
id	integer	9 cijfers	uniek nummer van deze combinatie van source en target
source	integer	9 cijfers	begin-node weg
target	integer	9 cijfers	eind-node weg
frc	integer	cijfer tussen 0 en 7. 0. Alle hoofdrijbanen van A-wegen (zowel Rijks- als Provinciale wegen) 1. Parallelbanen en verbindingswegen van A-wegen (zowel Rijks- als Provinciale wegen) + hoofdrijbanen N-rijkswegen 2. Alle overige banen op rijkswegen + hoofdrijbanen van provinciale wegen met wegnummer < 400 3. Alle overige banen op provinciale wegen 4. Banen op wegen van overige wegbeheerders waar de maximum snelheid groter is dan 50km/h 5. Banen op wegen van overige wegbeheerders waar de maximum snelheid gelijk is aan 50km/h 6. Alle overige banen die opengesteld zijn voor autoverkeer 7. Alle banen die niet zijn opengesteld voor autoverkeer Overgenomen van nationaalwegenbestand.nl (2023).	
speed	integer		In de tabel van Analyze is hier altijd '1' ingevuld. Deze kolom wordt verder niet gebruikt in dit onderzoek.
wegrichting	tekst	N, Z, O, W	
wegrichting_deg	integer		Hoek die de weg maakt (in graden)
roadauthoritytype	tekst	P (van provincie) R (van Rijk) T (van Particulier (particulier lichaam of persoon)) G (van gemeente) W (van waterschap)	
roadauthorityname	tekst		naam van verantwoordelijke provincie, rijk, etcetera
geom	geometrie		Coördinaten staan in Rijksdriehoekcoördinatenstelsel (RD New – EPSG:28992).

Floating Car Data

In onderstaande tabel worden de kolommen uit de dataset 'Floating Car Data' beschreven die relevant zijn voor dit onderzoek.

Kolomnaam	Datatype	Omschrijving
Session_id	Tekst	Elk voertuig krijgt elke datum een andere session_id.
Timestamp	Tijdstip	Op de seconde nauwkeurig.
Vehicle_type	Tekst	Bus, car, truck, lcv, unknown of other. Is soms leeg.
Speed	Integer	
Latitude	Integer	Delen door een miljoen voor 'normale' lengtegraad
Longitude	Integer	Delen door een miljoen voor 'normale' breedtegraad
Road_type	Tekst	11 opties, bijvoorbeeld 'motorway'. Is soms leeg.
Road_speed_limit	Integer	Maximumsnelheid van de weg. Is soms leeg.
Gme_id	Integer	Getal dat verwijst naar een tabel met gemeentes. Hiermee kan worden bepaald in welke gemeente een meting plaatsvond.
Wvk_id	Integer, kan gekoppeld worden aan NDW_wegvakken.	De locaties zijn door Analyze gekoppeld aan de wegvak-id's van het NDW.
Geom	Puntgeometrie	De latitude en longitude omgezet naar een format dat op een kaart kan worden bekeken

Bijlage II Bepalen wegingsfactoren Floating Car Data met lusdata

Introductie lusdata

De NDW heeft lusdata beschikbaar. De data is gemeten door 'lussen': meetlussen in de weg. Er zijn gegevens over het aantal voertuigen, en over de snelheid. In dit onderzoek worden alleen de gegevens over het aantal voertuigen gebruikt, ook wel de 'intensiteit' genoemd.

De gegevens van de lusdata zijn steeds per tijdslot van een uur, en omvatten de gemiddelde snelheid en het aantal voertuigen in dat tijdvak. Er is niet uitgesplitst naar dagen: De gemiddelde intensiteit op werkdagen wordt gegeven. (NDW, z.d.-a).

Sommige lussen splitsen hun data uit in verschillende voertuiglengtecategorieën. In Tabel 13 zijn deze categorieën weergegeven, met omschrijvingen. Als er maar 3 categorieën worden gebruikt dan worden categorie 1 en 2 samengevoegd, en categorie 4 en 5 worden samengevoegd.

Bij de uitsplitsing in voertuigcategorieën kan soms een klein deel (minder dan 1% van de voertuigen) niet worden ingedeeld, die worden ingedeeld als 'onbepaald'.

Tabel 13 Onderverdeling lengtes van voertuigen in vijf categorieën door het NDW. Aangepast overgenomen van NDW (z.d.-b).

Categorie	Omschrijving	Lengte-interval
Cat 1	motorrijwiel, scooter	$\geq 1,85$ en $\leq 2,40$ m
Cat 2	personenauto/bestelauto	$> 2,40$ en $\leq 5,60$ m
Cat 3	ongelede vrachtauto	$> 5,60$ en $\leq 11,50$ m
Cat 4	ongelede autobus	$> 11,50$ en $\leq 12,20$ m
Cat 5	gelede vrachtauto	$> 12,20$ en ≤ 25 m

Aandachtspunten

- Er kunnen meetpunten zijn waar geen data van wordt gegeven, vanwege een 'technische uitsluiting'.
- De uitsplitsing in categorieën komt niet helemaal overeen met de uitsplitsing bij de Floating Car Data. Het belangrijkste verschil is dat in categorie 2 zowel de personenauto's als de bestelauto's zitten, terwijl deze in de Floating Car Data uitgesplitst zijn.
- De verhouding tussen de Floating-Car-Aantallen en de lustellingen kan niet worden bepaald als er geen metingen door de lussen zijn gedaan, omdat delen door 0 niet kan. Dit is vooral aan de orde op rustige tijdstippen.

Databeschrijving

Van de lusdata wordt per lus de volgende informatie gebruikt in dit onderzoek:

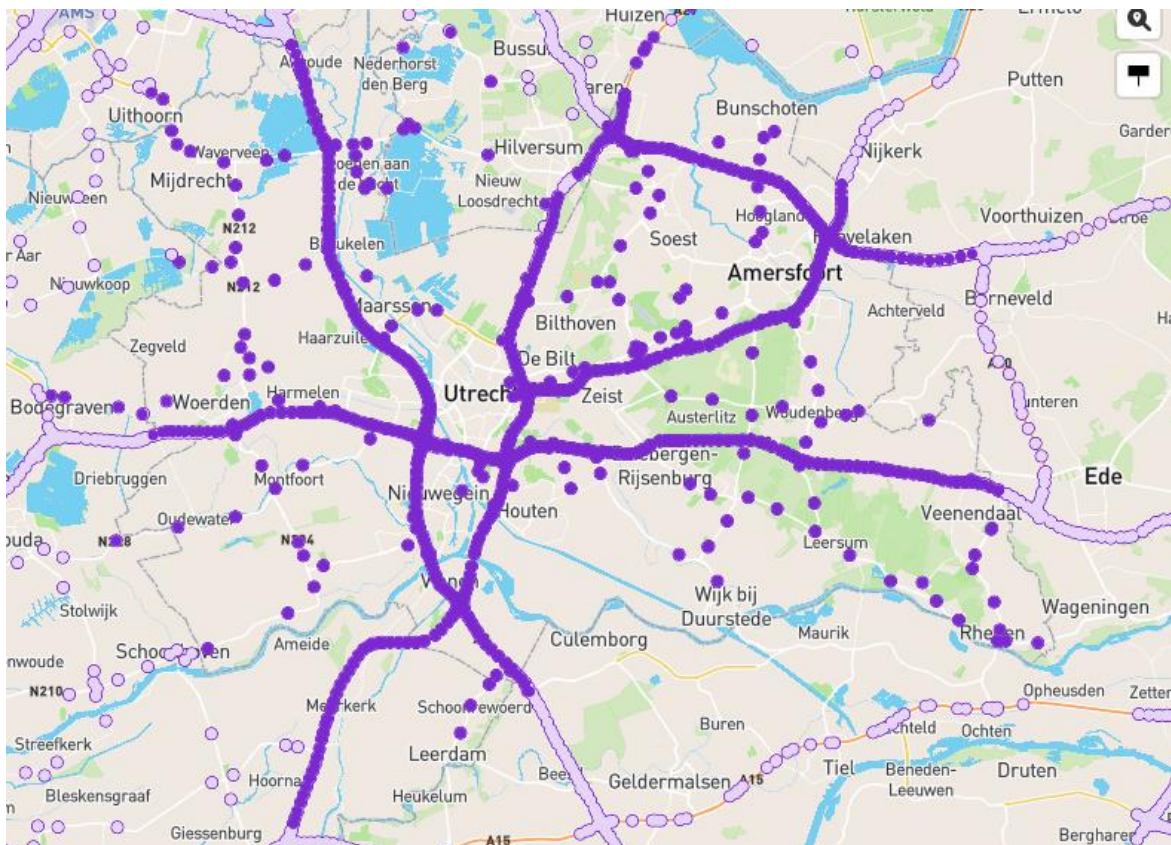
- ID en beschrijving
- Coördinaten
- Intensiteit per tijdslot van een uur
- Per voertuiglengtecategorie: het percentage van de intensiteit in het tijdslot dat in die voertuigcategorie viel. Er is ook een kolom voor 'onbepaald', voor metingen die niet in een voertuiglengtecategorie konden worden ingedeeld

Er zijn ook meetlussen met minder categorieën, of meetlussen die helemaal niet zijn uitgesplitst in voertuigcategorie.

Ophalen van de data & selecteren van meetlussen

Op het open-data-deel van DEXTER (een portaal) kan geaggregeerde historie van lusdata worden aangevraagd. Met het portaal kan van maximaal 20 locaties tegelijkertijd data worden opgehaald, terwijl er 2000 lussen in de provincie Utrecht liggen.

In Figuur 21 is de locatie te zien van de meetlussen in de provincie Utrecht.



Figuur 21 Meetlussen in provincie Utrecht. Schermafbeelding van <https://dexter.ndw.nu/opendata>

In Figuur 21 is te zien dat de lussen vooral op snelwegen liggen.

Er zijn alleen lussen gebruikt die een uitsplitsing hebben in voertuiglengtecategorieën, omdat deze voertuiglengtecategorieën kunnen worden omgezet naar voertuigcategorieën.

Er zijn alleen meetlussen gebruikt binnen provincie Utrecht, omdat dit onderzoek over provincie Utrecht gaat.

Sommige lussen liggen op een weg zonder middenberm. De Floating-Car-Data kan dan niet op een simpele manier uitgesplitst worden tussen de twee richtingen van de weg.

Het bruikbaarst in dit onderzoek zijn de meetlussen waar relatief veel verkeer over heen gaat, omdat de verhouding tussen de Floating Car Data en de lusdata dan het nauwkeurigst bepaald kan worden. Om de meetlussen met relatief veel verkeer te kiezen, en om te zorgen dat er geen meetlussen worden gekozen op wegen zonder middenberm, is de strategie toegepast om alleen meetlussen te selecteren die drie rijbanen meetten. Er waren geen meetlussen die meer dan drie rijbanen meetten.

Er waren 17 meetlussen in de provincie Utrecht die aan deze selectiecriteria voldeden. Omdat dit minder dan 20 meetlussen zijn, kan de data van deze lussen in één keer opgevraagd worden.

Stappenplan

- 1) Bepaal met de coördinaten van een meetlus het dichtstbijzijnde wegvak.
- 2) Controleer of het wegvak lang genoeg is. In de Floating Car Data stuurt een auto bijvoorbeeld elke 3 of 10 seconden een meting met een locatie. Als een wegvak dan kort is, zullen niet alle voertuigen in de Floating Car Data die over het wegvak rijden, ook daadwerkelijk een meting

hebben terwijl ze op het wegvak stonden. Daarom kan bij korte wegvakken de verhouding FCD/meetlus niet worden gebruikt. Sla het wegvak over als het korter is dan 200 meter. [de 17 meetlussen in dit onderzoek waren allemaal langer dan 200 meter].

- 3) Haal alle metingen op uit de FCD die op het betreffende wegvak hebben plaatsgevonden. Zijn er geen metingen op het wegvak? Dan stond het wegvak waarschijnlijk niet in de tabel. Sla dan deze meetlus over. [Dit was bij een van de meetlussen in dit onderzoek het geval.]
- 4) Bereken van de metingen: de afstand tussen de meting en het wegvak, en de afstand tussen de meting en de meetlus.
- 5) Splits de session_ids op in verschillende reis_ids. In dit geval betekent dat dat session_ids waar meer dan 20 minuten geen Floating Car Data van was, worden opgesplitst in twee reizen. Dit gebeurt bijvoorbeeld bij een heen- en een terugreis naar werk. Op die manier kan een session_id meerdere keren worden meegerekend, als dat voertuig daadwerkelijk meerdere keren over dezelfde weg reed.
- 6) Bewaar van elke reis_id alleen de meting het dichtstbij de meetlus.
- 7) Maak een kolom met de weekdag en een kolom met het tijdslot.
- 8) Groepeer op voertuigtype, weekdag en tijdslot, en tel het aantal metingen per groep. Hierbij wordt de voertuigen in categorie 2 gebruikt voor de 'cars' en de 'lcv's' (bestelbusjes), en categorie 3 en categorie 5 worden opgeteld en gerekend als 'trucks'.
- 9) Tel de metingen van alle werkdagen op, en deel door 5. Dit zorgt voor een gemiddelde op werkdagen.

Uitsplitsen auto's en LCV's (bestelbusjes)

In de lusdata vallen auto's in dezelfde voertuiglengtecategorie als bestelbusjes (lcv's), maar voor dit onderzoek moeten ze uitgesplitst worden, omdat in de Floating Car Data de bestelbusjes meer vertegenwoordigd zijn dan de auto's.

Bij deze uitsplitsing wordt gebruik gemaakt van het totaal aantal kilometers gereden in Nederland in een jaar door bestelbusjes, en het totaal aantal kilometers gereden in Nederland in een jaar door auto's. De getallen die worden gebruikt zijn afkomstig van het CBS (2023). Met deze twee getallen kan bepaald worden wat van de gereden kilometers, het aandeel is van auto's. Dit wordt vanaf dit moment de 'autofactor' genoemd.

Door de lusdata te vermenigvuldigen met de autofactor, kan een schatting worden gemaakt van het aantal auto's op die lus, en door de lusdata te vermenigvuldigen met $(1 - \text{autofactor})$ ontstaat een schatting van het aantal bestelbusjes op die lus.

Feit is de verhouding tussen auto's en bestelbusjes op verschillende tijdstippen anders is. Omdat bij het bepalen van de wegingsfactoren de aantallen van over de hele dag bij elkaar worden opgeteld, geeft dit geen afwijking van de werkelijkheid.

Laatste stappen

Verhouding per tijdslot, locatie en voertuigtype

Nu is er per meetlus de volgende informatie:

- Per voertuigtype en per tijdslot: het aantal voertuigen in de Floating Car Data op een gemiddelde werkdag
- Per voertuig en per tijdslot: het aantal voertuigen dat de lus heeft gemeten, op een gemiddelde werkdag

Om tot een factor te kunnen komen, wordt het aantal voertuigen van de hele dag opgeteld.

Vervolgens wordt berekend wat de verhouding is per meetlus en per voertuigtype, van het aantal voertuigen in de Floating Car Data en het aantal voertuigen in de lusdata.

Tot slot wordt er een gemiddelde gemaakt van alle lussen. Deze blijft wel uitgesplitst naar voertuigtype. Hierbij worden alleen de meestvoorkomende voertuigtypen meegenomen: car, lcv (bestelbusje) en truck.

Nu is bekend hoeveel procent van de voertuigen in de Floating Car Data zit. Dit is om te rekenen naar een wegingsfactor, door 1 te delen door dat percentage.

Deze wegingsfactoren zijn weergegeven in Tabel 14. In deze tabel zijn de wegingsfactoren afgerond op drie decimalen.

Tabel 14 wegingsfactoren Floating Car Data

Voertuigtype	Wegingsfactor
Car	390.967
Lcv (bestelbusje)	17.185
Truck	37.696

Wat vooral opvalt in Tabel 14 is de wegingsfactor van de auto's: elke auto in de Floating Car Data representeert meer dan 300 auto's. Dit is veel meer dan de wegingsfactoren van de lcv's en de trucks.

Tabel 14 onderstreept het belang van het gebruik van wegingsfactoren bij het gebruik van de Floating Car Data: als er geen wegingsfactoren zouden worden gebruikt, zou het aantal voertuigen sterk worden onderschat, en zou het aantal auto's ten opzichte van het aantal busjes ook heel anders liggen.

Bijlage III Wegkenmerken bepalen

De belangrijkste dataset die bij deze stappen wordt gebruikt, is de dataset 'nwb-wegvakken'. In deze tabel staan gegevens per wegvak. Hierbij is een wegvak een deel van een weg, meestal van kruispunt tot kruispunt.

In deze bijlage worden gegevens uit andere datasets aan deze dataset gekoppeld.

In de dataset 'nwb-wegvakken' is er een kolom 'frc'. 'Frc' staat voor 'Functional Road Class', en geeft informatie over hoe belangrijk een weg is. Hoe groter de weg, hoe kleiner de Functional Road Class.

Importeren	Importeer de wegvakken die minstens deels binnen de gemeente Vijfheerenlanden vallen, en die volgens de Functional Road Class toegankelijk zijn voor auto's.
Maximum-snelheden	• Koppel daar de tabel van de maximumsnelheden aan. • In de tabel van maximumsnelheden zitten enkele waarden die geen geheel getal zijn. Verwijder die waarden. • Vul de lege waarden met de gemiddelden per Functional Road Class. • Vervang de maximumsnelheden groter dan 100 door 100. In Nederland gelden de maximumsnelheden groter dan 100 namelijk alleen om bepaalde tijdstippen buiten de spits, terwijl in dit onderzoek juist alleen de ochtend- en avondspits wordt meegenomen.
Rijstroken per richting	• Bepaal per 'absolute waarde van het wegvak_id' hoeveel richtingen de weg heeft. De breedte die wordt gegeven hoort namelijk bij beide richtingen samen. • Importeer de tabel met wegbreedtes, en gebruik hier per wegvak alleen de waarde die over het grootste deel van dat wegvak geldt. Er worden namelijk meerdere waarden gegeven: voor verschillende delen van het wegvak verschillende waarden. Bereken het aantal rijstroken met $\frac{\text{wegbreedte}}{\text{aantal richtingen}}$. Er wordt gedeeld door 3,5, omdat een rijstrook in Nederland meestal 3,5 meter breed is. Rond af op gehelen, en zorg voor een minimum van 1. Voor de rijen die nu geen waarde hebben gekregen: vul '2' in bij wegvakken met een Functional Road Class van 0, en vul anders '1' in. Op deze manier krijgen de grootste wegen zonder waarde 2 rijstroken per richting, en de rest van de wegen zonder waarde krijgt 1 rijstrook per richting. Vul voor enkele rijen die in het proces de verkeerde waarde bleken te hebben gekregen, handmatig de goede waarde in.
Capaciteiten	• Importeer excel-bestand met capaciteiten, overgenomen van Bunschoten & Kwant (2021). Dit excel-bestand geeft de capaciteit van verschillende soorten wegen. De wegen worden onder andere onderscheiden door het aantal rijstroken en door de maximumsnelheid. • Deze capaciteiten zijn per twee uur. Deel deze capaciteiten door 2 om de capaciteiten per uur te krijgen. • Groepeer het excel-bestand op maximumsnelheid en op aantal rijstroken. De informatie uit het excel-bestand over of een weg open of gesloten is voor landbouwverkeer, en of een weg binnen of buiten de bebouwde kom valt, wordt dus niet meegenomen. Maak vervolgens een gemiddelde per groep. Zo ontstaat dus een lijst waarin per maximumsnelheid en aantal rijstroken, de capaciteit kan worden afgelezen. • Het excel-bestand bevat niet de maximumsnelheden '15' en '30', terwijl deze wel in de data zitten. Vul voor 30 de kleinste waarde in uit de tabel. Vul voor 15 de helft van die waarde in. Het effect van deze wegen zal niet groot zijn, omdat

	de maximumsnelheid zo laag is, dat er niet snel routes over deze wegen zullen worden gepland, behalve bestemmingsverkeer is. • Het excel-bestand bevat ook niet de maximumsnelheid '70'. Maak hiervoor het gemiddelde van 60 en 80. • Bepaal voor elk wegvak aan de hand van het gegroepeerde excel-bestand de capaciteit. Staat de combinatie van maximumsnelheid en aantal rijstroken niet in de capaciteiten-tabel? Dan zijn er meer rijstroken berekend dan dat er in de excel-tabel stonden voor deze maximumsnelheid. Gebruik dan de capaciteits-waarde van het hoogst mogelijke aantal rijstroken en dezelfde maximumsnelheid, die wél in de tabel staat.
Alfa-waarde bepalen	Alfa is een parameter die aangeeft hoe sterk de reistijd groter wordt als de intensiteit op een wegvak dichter bij de capaciteit komt te liggen. De gebruikte alfa-waarden komen van het document van Bunschoten & Kwant (2021). Ze zijn gemaakt per wegcategorie, maar het bleek complex om de wegcategorie van de wegvakken in Vijfheerenlanden te bepalen. Daarom is besloten om de alfa-waarden van de wegen te bepalen op basis van de maximumsnelheid. Hierbij is gebruik gemaakt van de volgende dictionary: {15:2, 30:2, 50:1.5, 60:1, 70:0.75, 80:0.75, 100:0.5}. Op deze manier komen de wegen op ongeveer dezelfde alfa-waarden uit als wanneer de wegcategorie gebruikt zou worden.
Alfa- en capaciteit missende waarden	Bij het verlagen van de maximumsnelheid met 20 kilometer per uur, zoals gebeurt in dit onderzoek, ontstaan er maximumsnelheden die eerder niet voorkwamen: 10- en 40 kilometer per uur. Voor 10 kilometer per uur zijn de waarden van 15 gebruikt, en voor 40 kilometer per uur is het gemiddelde van 30 en 50 kilometer per uur gebruikt.
Filteren	Na dit proces zijn er nog wegvakken uit de tabel gehaald, die toch geen autoweg bleken te zijn volgens het wegtype uit een andere tabel. Het gaat hier bijvoorbeeld om busbanen. Ook zijn er enkele wegen handmatig uit de wegvakentabel gehaald, omdat gedurende het proces bleek dat dit bijvoorbeeld geen autowegen waren maar een fietstunnel.
lengte	Bepaal de lengte van de wegvakken. Deze informatie is nodig bij het bepalen van de reistijden over de wegvakken.
Bebouwde kom	Bepaal met de geometrie (data over de ligging) van de wegvakken en met de geometrie van gemeente Vijfheerenlanden, nog de volgende informatie: de lengte van het wegvak die in een bebouwde kom ligt, en hoe ver het midden van een wegvak, af ligt van het midden van de bebouwde kom waar het wegvak inligt. Deze informatie gaat gebruikt worden om te modelleren hoe lang verkeer in de bebouwde kom is. Ook wordt deze informatie gebruikt om te bepalen welk wegvak in het midden van de bebouwde kom ligt.

Bijlage IV Definiëren bebouwde kom

Bij het geografisch definiëren van dorpskernen, wordt in dit onderzoek gebruik gemaakt van de bebouwde kom.

Er zijn verschillende datasets beschikbaar over de bebouwde kom.

- Rijkswaterstaat heeft data beschikbaar over 'bebouwde kommen', maar deze blijken verre van volledig te zijn. In Nederland zijn slechts enkele plekken gemarkeerd als 'bebouwde kom'. Daarom wordt deze data niet gebruikt.
- Provincie Utrecht heeft een kaartlaag over bebouwde kommen, zoals die vastgesteld zijn door de Gedeputeerde Staten (data.overheid.nl; z.d.). In dit onderzoek is er een voorkeur voor het gebruik van data die landelijk beschikbaar is, zodat Analyse het onderzoek ook in andere gebieden zou kunnen herhalen. Daarom is deze dataset minder geschikt.
- De 'BasisRegistratie Topologie' (BRT) is een landsdekkende verzameling topografische bestanden, die ookwel TOPNL-kaart wordt genoemd (geobasisregistraties.nl, z.d.). Hiervan is de top10NL het basisbestand. In deze dataset zit een kaartlaag 'plaats'. Deze plaatsen hebben een gebiedstype, dit is één van de volgende waarden: 'buurt', 'buurtschap', 'deelkern', 'gehucht', 'industriekern', 'recreatiekern', 'stadsdeel', 'wijk', 'woonkern'. (Kadaster, z.d. - a). Ook bevat deze kaartlaag een kolom 'Bebouwde_kom', met als mogelijke waarden 'ja' en 'nee'.

Er is gekozen om de dataset van de BRT te kiezen, omdat deze landsdekkend is, en omdat hij grotendeels overeenkomt met de dataset van de provincie Utrecht.

In de bebouwde kommen zijn er volgens de BRT 3 gebiedstypen: industriekernen, recreatiekernen en woonkernen. Het grootste deel van de bebouwde kom bestaat uit woonkernen. In dit onderzoek wordt de hele bebouwde kom meegenomen, omdat het onderscheid tussen de verschillende kernen wellicht niet altijd duidelijk is en omdat de meeste bebouwde kommen woonkernen zijn.

Bijlage V Ruwe tabel doelfunctiewaarden avondspits

Doelfunctiewaarden zijn allemaal gegeven in minuten.

Omschrijving	afkorting	Totale Reistijd	Totale Komtijd	Kleineweg tijd	Totale Reistijd	Totale Komtijd	Kleineweg tijd	Totale Reistijd	Totale Komtijd	Kleineweg tijd
		Bestemmingsverkeer			Doorgaand verkeer			Al het verkeer		
Huidige situatie	ue	43082,45	13404,47	14183,44	296280,07	8552,87	9313,85	339362,52	21957,34	23497,30
Optimum met minimale reistijd	so	43131,36	13883,65	14727,50	295086,96	8724,08	9361,74	338218,32	22607,73	24089,24
Optimum met weinig sluisverkeer	so_antisluis	42542,25	13367,56	14192,94	297358,64	6655,50	7096,23	339900,89	20023,06	21289,18
Optimum met gesloten wegvakken	so_linksweg	42524,19	13413,73	14239,13	297376,61	6609,45	7050,43	339900,79	20023,18	21289,56
Maatregel 1	ue_linksweg	43083,83	13385,57	14158,29	296282,57	8568,80	9346,34	339366,40	21954,37	23504,63
Maatregel 2	ue_langzamer	42945,71	13270,19	14049,11	296332,73	7785,13	8471,86	339278,44	21055,32	22520,97