



TrafficQuest
CENTRE FOR EXPERTISE ON TRAFFIC MANAGEMENT

TrafficQuest rapport

Artificial Intelligence in verkeersmanagement

Een quickscan analyse



Colofon

Auteurs Erwin Walraven (TNO)
Dawn Spruijtenburg (TNO)
Isabel Wilmink (TNO)
Max Schreuder (TNO)

Datum 1 oktober 2021

Versienummer 1.0

Uitgegeven door TrafficQuest
Postbus 2232
3500 GE UTRECHT

Informatie Henk Taale

Telefoon +31 88 798 24 98

Foto voorkant Jeroen van den Heuvel

TrafficQuest is een samenwerkingsverband van





TrafficQuest
CENTRE FOR EXPERTISE ON TRAFFIC MANAGEMENT

Artificial Intelligence en verkeersmanagement

Huidige en toekomstige toepassingen

1 oktober 2021

Inhoudsopgave

Voorwoord.....	4
1. Introductie	5
1.1. Doel en scope	6
1.2. Artificial Intelligence.....	6
1.3. Verkeersmanagement	8
1.4. Onderzoeksaanpak	9
1.5. Rapportstructuur	9
2. Monitoren en detecteren	11
2.1. Huidige toepassingen	11
2.2. Toekomstige toepassingen	13
2.3. Samenvatting.....	16
3. Informereren, adviseren en waarschuwen	17
3.1. Huidige toepassingen	17
3.2. Toekomstige toepassingen	19
3.3. Samenvatting.....	21
4. Sturen en regelen	22
4.1. Huidige toepassingen	22
4.2. Toekomstige toepassingen	23
4.3. Samenvatting.....	26
5. Overzicht van toepassingen.....	27
6. Conclusie en aanbevelingen.....	29
Literatuur	32
Bijlagen	35
A. Bekeken bronnen in quick-scan	35
B. Deelnemers expert interviews	36
C. Volledige lijst toekomstige toepassingen.....	37
D. Selectiecriteria	38
E. Workshop toekomstige toepassingen.....	38

Voorwoord

De TrafficQuest Challenge van dit jaar heeft zich gericht op het onderwerp AI en verkeersmanagement. Met veel plezier heeft het projectteam aan deze challenge gewerkt. Op het raakvlak van verkeersmanagement en kunstmatige intelligentie zijn veel interessante toepassingen te bedenken, en binnen deze challenge kregen wij de kans om hier dieper in te duiken. Daarbij hebben we veel interessante gesprekken en discussies gevoerd over deze onderwerpen. Voor deze discussies, en ook voor de waardevolle informatie die we hebben opgehaald tijdens de interviews en de workshop willen we dan ook iedereen die ons te woord heeft gestaan in de interviews en alle aanwezigen van de workshop bedanken.

1. Introductie

Artificial Intelligence (AI) is een interdisciplinair werkveld waarin systemen worden ontwikkeld die in staat zijn om taken uit te voeren die doorgaans menselijke intelligentie vereisen (Russell en Norvig, 2020). AI staat momenteel in het middelpunt van de wetenschappelijke belangstelling, en vindt daarnaast steeds meer een weg naar toepassingen in diverse domeinen. Daarom is het ook van belang om te onderzoeken wat AI voor verkeersmanagement kan betekenen. Veel onderzoek wordt gedaan op het gebied van patroonherkenning, bedoeld om automatisch rijden mogelijk te maken. Maar zijn er ook nog andere gebieden binnen verkeersmanagement die zouden kunnen profiteren van de mogelijkheden die AI biedt? Om dat te onderzoeken is een TrafficQuest challenge uitgevoerd.

TrafficQuest was het samenwerkingsverband tussen Rijkswaterstaat, TNO en de TU Delft op het gebied van verkeersmanagement en verkeersinformatie (www.trafficquest.nl). Deze samenwerking heeft zich van 2009 tot en met 2016 beziggehouden met het ontwikkelen, samenbrengen, toepassen en verspreiden van kennis over VMI – verkeersmanagement en verkeersinformatie. Meer dan zeven jaar bestreek TrafficQuest het hele terrein van de meer fundamentele, theoretische kennis over VMI tot 'operationele kennis' over de toepassing en effectiviteit van VMI. Eind 2016 is besloten op kleinere schaal verder te gaan, en de activiteiten te concentreren op een aantal actuele challenges en op de uitgave van 'Verkeer in Nederland', een boekje met het TrafficQuest jaarbericht. Hierin wordt een overzicht gegeven van huidige verkeersafwikkeling en ontwikkelingen in verkeersmanagement.

Een challenge is een quick scan analyse door experts en met een korte doorlooptijd. Challenges zijn bedoeld om specifieke onderwerpen die met verkeersmanagement te maken hebben op te pakken en nader uit te werken. Inmiddels zijn challenges uitgevoerd over de vervanging van wegwagensystemen door in-carsystemen, verkeersmanagement en verkeersveiligheid, de impact van C-ITS use cases en 3D-printen.

Voor deze challenge heeft TNO de vraag gekregen van Rijkswaterstaat om te kijken naar de potentiële toepassingen van Artificial Intelligence (AI), ook bekend als Kunstmatige Intelligentie (KI), in verkeersmanagement en verkeersinformatie op de korte termijn (1-5 jaar). Het gaat hierbij om zowel de huidige toepassingen als de toekomstige toepassingen. Voor de huidige en toekomstige toepassingen zijn belangrijke vragen:

- Welke toepassingen zijn er nu?
- Welke meerwaarde bieden deze?
- Welke mogelijkheden zijn er in de nabije toekomst (1-5 jaar)?
- Wat is nodig om deze mogelijkheden te realiseren?

Bij de laatste vraag moet vooral gedacht worden aan de benodigde data.

In dit hoofdstuk wordt het doel en de scope van de challenge toegelicht. Daarnaast wordt een globale introductie gegeven over de onderwerpen Artificial Intelligence en verkeersmanagement. Vervolgens wordt een beschrijving gegeven van de gevolgde onderzoeksmethodiek tijdens de challenge. Tenslotte wordt er kort vooruitgeblikt op de overige hoofdstukken.

1.1. Doel en scope

In deze challenge wordt een overzicht gemaakt van huidige en toekomstige toepassingen van AI in verkeersmanagement. Hiermee wordt een beeld geschetst van het veld en de state-of-the-art, en er wordt vooruit gekeken naar de potentie voor de toekomst. Uit de huidige toepassingen wordt duidelijk welke AI-technieken al volwassen zijn, welke databronnen bruikbaar zijn, en welke lessen hieruit geleerd kunnen worden. Hierbij wordt vooral gefocust op toepassingen die reeds geïmplementeerd zijn of getest als pilot. Voor de toekomstige toepassingen wordt vooral gefocust op de toepassingen waarbij domeinexperts de grootste verbetering verwachten op het gebied van doorstroming, veiligheid en duurzaamheid. Bij de toekomstige toepassingen wordt ook gekeken naar wat de mogelijke valkuilen en uitdagingen bij de implementatie zijn. Voor de geselecteerde toekomstige toepassingen is de verwachting van experts dat implementatie binnen 1 tot 5 jaar kan plaatsvinden.

1.2. Artificial Intelligence

Artificial Intelligence (AI) is een verzamelterm van alle theorie en ontwikkelingen die computersystemen in staat stellen om taken uit te voeren die doorgaans menselijke intelligentie vereisen. Voorbeelden hiervan zijn visuele perceptie, zoals het herkennen van objecten, en het herkennen en verwerken van gesproken taal (bijvoorbeeld zodat de computer begrijpt wat er in gesproken taal gezegd wordt). Daarnaast omvat AI ook het automatisch aansturen van andere systemen met algoritmes, en het nemen van beslissingen over dergelijke systemen, zodanig dat het systeem zo goed mogelijk functioneert. Een voorbeeld hiervan is het regelen van het verkeerssysteem met AI, zodanig dat de doorstroming wordt geoptimaliseerd. AI is een multidisciplinair veld waarin o.a. wiskunde, informatica en regeltechniek worden gecombineerd met domeinspecifieke kennis om systemen te ontwikkelen die taken kunnen uitvoeren die bij uitvoering door de mens intelligentie vereisen. In de literatuur zijn meerdere definities beschreven voor AI. Voor een volledige reflectie verwijzen we naar het boek van Russell en Norvig (2020).

Binnen het vakgebied AI zijn er diverse deelgebieden die zich richten op een specifieke techniek. Deze deelgebieden staan in de praktijk niet op zichzelf. In veel gevallen worden er toepassingen ontwikkeld waarin meerdere deelgebieden worden samengebracht. De verdeling in deelgebieden kan op verschillende manieren worden gedaan en is in de literatuur niet uniek gedefinieerd. De onderstaande deelgebieden geven een globaal overzicht van het vakgebied:

- Machine learning: algoritmes die in staat zijn om te leren op basis van data of op basis van ervaringen (Alpaydin, 2020). Hierbij gaat het bijvoorbeeld om het genereren van voorspellingen of het herkennen van patronen in data. Supervised learning omvat alle methodes die leren op basis van voorbeelden, waarbij de gewenste output bekend is (zoals bijvoorbeeld de aanwezigheid van een kat in een foto). Unsupervised learning heeft deze gewenste output niet nodig, en

wordt bijvoorbeeld gebruikt om patronen of clusters te herkennen in data. Een andere veelgebruikte term is deep learning (Goodfellow et al, 2016). Dit is een machine learning techniek waarbij (diepe) neurale netwerken worden getraind met behulp van data.

- Natural language processing: het begrijpen en verwerken van natuurlijke taal (Raaijmakers, 2021). Hierbij gaat het bijvoorbeeld om chatbots die in staat zijn om te begrijpen wat de mens zegt.
- Speech processing: het herkennen en eventueel vertalen van gesproken taal (Rabiner & Schafer, 2010). Dit wordt bijvoorbeeld toegepast in mobiele telefoons, waar de mens in gesproken taal opdrachten aan kan geven. Speech processing betreft altijd gesproken taal waar een computer naar luistert, terwijl natural language processing zich richt op het analyseren van de tekst nadat de computer dit omgezet heeft in data.
- Computer vision: het verwerken van stilstaande en bewegende beelden, en begrijpen wat daarin gebeurt (Szeliski, 2010). Denk hierbij aan het herkennen van objecten op foto's.
- Expert systems: dit betreft systemen die specifieke kennis van menselijke experts bezitten om in specifieke gebieden problemen op te lossen (Gupta & Nagpal, 2020). Een voorbeeld is het analyseren van een ziektebeeld aan de hand van vragen die het systeem stelt en de mens beantwoordt.
- Planning, scheduling and control: systemen die zelfstandig bepalen welke acties uitgevoerd moeten worden om een doel te bereiken (Kochenderfer, 2015). Een voorbeeld is het aansturen van verkeerslichten om doorstroming te maximaliseren. In deze challenge valt ook reinforcement learning (Sutton & Barto, 2018) binnen dit deelgebied. Dit is een populaire machine learning techniek waarbij een systeem zelfstandig beslist over uit te voeren acties, en op basis van de resultaten van die acties leert het systeem om steeds beter te functioneren. Dit leerproces werkt op basis van een beloningsfunctie, die het systeem beloont voor het tonen van goed gedrag waarmee het einddoel van het systeem wordt bereikt (zoals doorstroming maximaliseren).

AI krijgt momenteel veel aandacht en heeft recent tot diverse doorbraken geleid, zoals het ontwikkelen van zelflerende systemen die het spel Go beter kunnen spelen dan de mens (Silver et al., 2016). Het lijkt er soms op dat AI een volledig nieuwe technologie is, maar eigenlijk gaat het om technologie die in de loop van de tijd in diverse vakgebieden is ontstaan. De wortels van AI liggen oorspronkelijk in o.a. de filosofie, logica, wiskunde, psychologie en biologie. In de loop van de 20^e eeuw is dit uitgegroeid tot een groot overkoepelend vakgebied. De recente successen die zijn behaald met AI zijn gerealiseerd door de steeds verder toenemende rekenkracht van computers, en de toenemende beschikbaarheid van data. De verwachting is dat dit in de toekomst een nog grotere vlucht zal nemen en tot meer intelligente toepassingen in de samenleving zal leiden.

Systemen die worden ontwikkeld met behulp van AI worden steeds complexer, waardoor het voor de mens steeds ingewikkelder wordt om te doorgronden hoe het systeem werkt en waarom een systeem tot bepaalde beslissingen of voorspellingen is gekomen. Een voorbeeld is het openen of sluiten van een spitsstrook. Dit gebeurt momenteel deels handmatig, en deels via een op regels gebaseerd verkeerskundig algoritme. Op het moment dat een AI-systeem aangeeft dat het beter is om de spitsstrook te sluiten, dan is het wenselijk dat de mens begrijpt waarom het AI systeem tot die conclusie gekomen is. Een huidige trend is het ontwikkelen van technieken om AI-gebaseerde

beslissingen uitlegbaar en meer transparant te maken (Adadi & Berrada, 2018), zodat het voor de mens duidelijker wordt hoe een AI-systeem tot een voorspelling of beslissing is gekomen.

Hoewel AI momenteel in het middelpunt van de belangstelling staat en grote successen heeft gerealiseerd, zijn er ook beperkingen die voor risico's zorgen bij de toepassing van AI. Een voorbeeld is het herkennen van objecten op basis van camerabeelden, zoals verkeersborden. Het blijkt dat het in sommige gevallen mogelijk is om een met data getraind AI-systeem om de tuin te leiden door minimale, en voor de mens onzichtbare, wijzigingen aan te brengen in deze camerabeelden. Dit zou er bijvoorbeeld voor kunnen zorgen dat een rood verkeerslicht wordt herkend als een groen verkeerslicht, wat vervolgens tot gevaarlijk rijgedrag kan leiden als een automatisch voertuig deze informatie gebruikt om beslissingen te nemen. Een ander voorbeeld is het herkennen van gevechtsvliegtuigen op satellietbeelden, waarbij het plakken van kleine stickers er al voor kan zorgen dat het AI-systeem de vliegtuigen niet meer kan herkennen (Den Hollander et al, 2020). Kwetsbaarheden zoals deze laten zien dat toepassing van AI in de praktijk uitdagingen met zich meebrengt en erg zorgvuldig dient te gebeuren.

AI heeft grote potentie en de verwachting is dat het in de nabije toekomst een grote bijdrage zal leveren aan het behalen van maatschappelijke doelen. Om deze ambities waar te maken, worden er bij bedrijven en overheid steeds meer AI-initiatieven opgezet (bijvoorbeeld binnen de NL AI Coalitie), en ook op universiteiten begint AI een steeds grotere rol te spelen in studieprogramma's. Ook kennisinstellingen, zoals TNO, dragen hieraan bij met overkoepelende programma's zoals Appl.AI, waarin nieuwe wetenschappelijke resultaten op het gebied van AI in samenwerking met partners worden geïntegreerd in toepassingen.

1.3. Verkeersmanagement

De definities van verkeersmanagement verschillen, maar eenvoudig gesteld heeft verkeersmanagement het doel om vraag en aanbod zodanig te beïnvloeden, dat de verkeersvraag en het capaciteitsaanbod van het netwerk beter 'matchen', zowel in tijd als in ruimte. De problemen die zich op het wegennet voordoen, betreffen vooral specifieke knelpunten en specifieke momenten (de spitsen, incidenten en evenementen). Door de verkeersvraag te spreiden of het aanbod van infrastructuur dynamisch aan te passen, kan het bestaande wegennet beter benut worden. Typische verkeersmanagementmaatregelen zijn toeritdosering, dynamische maximumsnelheden, spitsstroken, maar ook verkeersinformatie op panelen boven de weg of via andere kanalen. De maatregelen zijn in eerste instantie bedoeld om de bereikbaarheid te verbeteren, maar ze worden ook steeds vaker ingezet om de verkeersveiligheid (bijvoorbeeld door filestaartbeveiliging) of leefbaarheid (bijvoorbeeld door snelheidsbeperkingen) te verbeteren (Hoogendoorn et al., 2011).

Verkeersmanagement kan verschillende verkeerskundige functies vervullen:

- Monitoren en detecteren: monitoren en detecteren van verkeer en incidenten.
- Informereren: bewegwijzering, routeinformatie, netwerktoestand, reistijden, rijstrookindeling.

- Adviseren: adviseren over rijstrook, snelheid, alternatieve routes.
- Waarschuwen: filestaartbeveiliging, filestaartsignalering, gevaarlijke situaties, verstoringen.
- Sturen en regelen: verlagen snelheidslimiet, veranderen rijbaanindeling, rijstrook openen of sluiten, hoogtemelding afhandelen, stoppen van verkeer, inhaalverbod, doseren, bufferen.

Onderdelen die niet onder verkeersmanagement vallen zijn mobiliteitsmanagement (maatregelen zoals spitsmijden) en betalen naar gebruik (zoals congestieheffing). Dit soort maatregelen kunnen er echter wel voor zorgen dat de verkeersstromen plaatselijk of tijdelijk minder groot zijn en daardoor makkelijker beheersbaar. De AI-toepassingen in dit rapport zijn gecategoriseerd naar de verkeersmanagementfuncties. Hierbij zijn informeren, adviseren en waarschuwen samengevoegd, omdat deze categorieën allen focussen op informatieoverdracht naar de weggebruiker of naar de verkeerscentrale.

1.4. Onderzoeksaanpak

In dit onderzoek wordt gekeken naar zowel de huidige als de toekomstige toepassingen van AI in verkeersmanagement. Om informatie te verzamelen zijn er verschillende bronnen geraadpleegd en zijn de volgende activiteiten ondernomen:

- Interviews: Er zijn interviews gehouden met experts op het gebied van AI en verkeersmanagement. De lijst met geïnterviewde experts is te vinden in bijlage B. In deze interviews is gefocust op zowel de huidige als de toekomstige toepassingen van AI in verkeersmanagement. Ook is gevraagd naar mogelijke kansen en belemmeringen.
- Quick scan analyse: Als aanvulling op de interviews zijn relevante en actuele bronnen bestudeerd waarin toepassingen van AI in verkeersmanagement beschreven zijn. De interviews hebben sturing gegeven aan de onderwerpen en bronnen die bekeken werden. De focus lag hierbij op de huidige toepassingen die al geïmplementeerd zijn, en welke meerwaarde deze bieden. De bestudeerde bronnen zijn te vinden in bijlage A.
- Selectie van meest veelbelovende toepassingen: Op basis van de verzamelde informatie is een selectie gemaakt van meest veelbelovende toekomstige toepassingen. Hiervoor zijn er selectiecriteria opgesteld, zoals ingeschatte succeskans en wenselijkheid (bijlage D). De volledige lijst van toekomstige toepassingen voor selectie is te vinden in bijlage C.
- Uitwerking van meest veelbelovende toepassingen: De meest veelbelovende toepassingen zijn in een werksessie besproken en uitgewerkt. De deelnemers aan de werksessie zijn genoemd in bijlage E. Hierbij is zoveel mogelijk uitgewerkt hoe de toepassing werkt, hoe implementatie eruit zal zien, en welke impact verwacht kan worden.

1.5. Rapportstructuur

Dit rapport is als volgt opgebouwd. Hoofdstuk 2, 3 en 4 behandelen de toepassingen binnen drie verkeersmanagementfuncties, monitoren en detecteren (hoofdstuk 2), informeren, adviseren en

waarschuwen (hoofdstuk 3) en sturen en regelen (hoofdstuk 4). Binnen deze hoofdstukken worden de huidige en toekomstige toepassingen behandeld, en wordt een korte samenvatting gegeven van wat AI binnen de verkeersmanagementfunctie kan betekenen. De inzichten uit de interviews, literatuur quick scan en de werksessie zijn geïntegreerd in de beschrijving van de toepassingen. In hoofdstuk 5 wordt een overzicht gegeven van alle toepassingen. Hoofdstuk 6 bevat de conclusies en aanbevelingen.

2. Monitoren en detecteren

Door middel van monitoren en detecteren kunnen situaties op de weg geanalyseerd worden. De verzamelde informatie kan gebruikt worden om beslissingen op te baseren, of de data kan gebruikt worden om verbanden te herkennen. Hierbij gaat het om toepassingen als het schouwen van de spitsstrook, of het monitoren van aantallen weggebruikers op een bepaald moment. Er zijn verschillende databronnen, zoals videobeelden, waarbij AI het mogelijk maakt om deze in grote getale en geautomatiseerd te analyseren.

2.1. Huidige toepassingen

Er zijn al verschillende toepassingen waarbij AI gebruikt wordt om het verkeer beter te kunnen monitoren, en situaties goed te kunnen detecteren. Toepassingen maken gebruik van AI om data op hoger detailniveau te brengen. Daarnaast worden nieuwe sensoren, voornamelijk camera's, gebruikt om bijvoorbeeld verkeersstromen van verschillende vervoerswijzen te meten.

Dataverrijking en meer inzichten afleiden uit data

Aan de basis van verschillende toepassingen met AI ligt data van hoge kwaliteit. Er zijn verschillende initiatieven om de voor verkeersmanagement en verkeersinformatie beschikbare data te verbeteren en op deze manier meer inzichten uit de data te verkrijgen. Om data van hoge kwaliteit te creëren en om deze inzichten op te doen, worden verschillende AI-technieken gebruikt. Waar in het verleden vaak gebruikgemaakt werd van data uit lusedetectoren, worden nu ook alternatieve sensoren gebruikt, of wordt de data verrijkt. Data uit uitsluitend lusedetectoren kan namelijk onvolledig of onnauwkeurig zijn. Verrijken minimaliseert onnauwkeurigheid en maximaliseert dekking.

Het Britse VivaCity gebruikt video-sensoren en verwerkt de data met behulp van convolutional neural networks. Dit zijn neurale netwerken die geschikt zijn om visuele beelden te analyseren. Hiermee verkrijgen ze informatie over aantallen voertuigen/reizigers en de classificatie van de voertuigen. Dit laatste gebeurt in meer categorieën dan de lusedetectoren kunnen onderscheiden, zodat ook bijvoorbeeld micromodaliteiten zoals stepjes meegenomen kunnen worden. Ook reistijden en bijna-ongevallen kunnen uit deze data worden herleid. De systemen van VivaCity zijn aanwezig in veel grote steden in het Verenigd Koninkrijk, zoals Londen, Manchester en Bristol. Bovenop deze data kunnen toepassingen gebouwd worden. VivaCity gebruikt ook recurrent neural networks om voorspellingen van aantallen voertuigen/reizigers en snelheden te doen op de korte termijn. Dit zijn neural networks die geschikt zijn om reeksen van temporele data te verwerken, en de resulterende voorspellingen vervangen korte termijn simulaties die normaalgesproken worden uitgevoerd. Het gaat hierbij vooral om voorspellingen tot ongeveer 3 uur in de toekomst. Met deze voorspellingen zijn mogelijke toepassingen te bedenken, zoals bijvoorbeeld sturing via de matrixborden (Vivacity Labs, z.d.).

Ook het Amerikaanse INRIX gebruikt convolutional neural networks om hogere kwaliteit data te verkrijgen. De algoritmes van INRIX gebruiken floating car data. Hiermee worden real-time tellingen

en snelheden verkregen. Dit leidt tot meer data en een voordeel is dat het hele netwerk kan worden bemeten, want ook locaties zonder lusedetectoren zoals kleinere wegen worden meegenomen. Detectie van veranderingen in snelheid en intensiteit is hiermee gemakkelijk te implementeren. Bovendien wordt de data per interval van 1 minuut opgeslagen en gearchiveerd, waardoor toekomstige toepassingen met deze data getraind kunnen worden. De technologie van INRIX kan bijvoorbeeld gebruikt worden om een toepassing voor filestaartbeveiliging of andere veiligheidswaarschuwingen voor snelheidsveranderingen te ontwikkelen. De informatie hiervoor is al beschikbaar, en zou dan gepresenteerd moeten worden aan de weggebruiker via matrixborden of in-vehicle applicaties (INRIX, z.d.). Bij een dergelijke toepassing is het zeer belangrijk dat deze uitvoerig getest wordt, omdat fouten van het systeem tot grote (fatale) gevolgen kunnen leiden.

Detectie van mobiele telefoongebruik achter het stuur met slimme camera's

De Nederlandse politie heeft beschikking over een aantal slimme camera's. De camera's kunnen op verschillende locaties geplaatst worden, en steeds verplaatst worden. De camera's maken foto's van voorbijrijdende auto's en beslissen op basis van deze fotobeelden of er vermoed wordt dat er een telefoon wordt vastgehouden door de autobestuurder. Minder gebruik van de handheld mobiele telefoon achter het stuur verhoogt naar verwachting de verkeersveiligheid (Politie, 2019). De slimme camera's maken hierbij gebruik van deep learning, waarbij de invoer van het netwerk bestaat uit een foto, en de uitvoer is een getal tussen 0 en 1 dat aangeeft of een telefoon wordt vastgehouden. De foto's waarop (vermoedelijk) een telefoon wordt vastgehouden, worden ter controle doorgestuurd en handmatig gecheckt. Als bevestigd wordt dat er een telefoon vastgehouden is, dan wordt op kenteken een verkeersboete verstuurd. De toegevoegde waarde van AI in deze toepassing is het geautomatiseerd en op grote schaal herkennen van bellende bestuurders. Voor de mens zou dit een erg arbeidsintensieve taak zijn. Een uitdaging is dat er bij het construeren van het model foto's gebruikt moeten worden waarbij de mens vooraf heeft bekeken of de bestuurder aan het bellen is. Deze handmatig gelabelde data dient te worden gebruikt om het model te trainen.

Spitsstroken schouwen met slimme camera's

Rijkswaterstaat maakt in verkeerscentrales ook gebruik van camerabeelden bij het schouwen van spitsstroken. In verkeerscentrales werd geobserveerd dat mensen veel routinematig werk deden, zoals bijvoorbeeld het herkennen van objecten op een spitsstrook. Dit is doorgaans werk waar mensen op lange termijn niet goed in zijn, bijvoorbeeld als gevolg van vermoeidheid. Om het herkennen van objecten te automatiseren en mensen te ontlasten, is een systeem ontwikkeld dat automatisch objecten herkent op basis van videobeelden (AI-deelgebied computer vision). Hierdoor kunnen mensen hun aandacht in de verkeerscentrale richten op andere dingen. Bij de ontwikkeling van het systeem is gebleken dat het een uitdaging is om te testen of het systeem goed werkt, en vooral of het goed genoeg werkt om taken van mensen over te nemen. In een verkeerscentrale zijn medewerkers verantwoordelijk voor de beslissingen die worden genomen, en op het moment dat een computersysteem zelfstandig een verkeerde beslissing neemt dan ontstaat de vraag wie daar verantwoordelijk voor is. Dit betekent dat systemen eerst uitvoerig getest moeten worden voordat inzet in de praktijk mogelijk is.

Tellen van fietsers en voetgangers

Het tellen van fietsers en voetgangers is vaak een lastige opgave. Bij het gebruiken van detectielussen in het wegdek moet bijvoorbeeld rekening gehouden worden met het gedrag van fietsers, die soms over de stoep fietsen. Andere problemen kunnen zijn dat sommige fietsen, zoals bakfietsen, dubbele wielen hebben. De FlowCube, ontwikkeld door Technolution, kan individuele fietsers en voetgangers tellen in stedelijk gebied, en daarmee dichtheidsindicaties geven. Wanneer meerdere sensoren gekoppeld zijn, is het ook mogelijk om routes en reistijden te bepalen. Het systeem gebruikt hiervoor camerabeelden die met deep learning technieken geanalyseerd worden. Op basis van objectkarakteristieken is het systeem in staat om individuele voetgangers en fietsers te onderscheiden. AI speelt hierbij een belangrijke rol, omdat het systeem op basis van geannoteerde data leert hoe voetgangers en fietsers van elkaar onderscheiden kunnen worden. Hierdoor is het niet nodig om handmatig een complexe set van beslisregels te implementeren. Mogelijke voorbeelden van toepassingen van dit systeem zijn om de informatie van FlowCube te gebruiken om in- en uitstaptijd in te schatten bij tramhaltes, om hiermee bij de verkeerslichten de tram op het juiste moment groen te kunnen geven. Een ander voorbeeld is het afstemmen van stadsdistributie op de pieken van aantallen voetgangers en fietsers, door bijvoorbeeld de piek van voetgangers op zaterdagmiddag in veel steden te vermijden. FlowCube is op dit moment geïmplementeerd in bijvoorbeeld Groningen, Rotterdam en Kopenhagen (Technolution Move, z.d.-a).

Verkeerslichten optimaliseren met AI

Met de toepassing 'signal analytics' verkrijgt INRIX meer inzichten uit verkeersstromen bij verkeerslichten. Op dit moment zit de toegevoegde waarde enkel in het beter begrijpen van de verkeersstromen, en om hieruit goed gegronde beslissingen te kunnen nemen. Het automatisch uitvoeren van aanpassingen van de verkeerslichtinstellingen of het voorstellen van aanpassingen is nog niet geïmplementeerd. Gedetailleerde informatie over wachttijd, verkeersvraag per richting, en de verkeersprestaties van de verkeerslichten is beschikbaar. De toepassing maakt gebruik van de technieken van AI traffic van INRIX, met convolutional neural networks (INRIX, z.d.).

2.2. Toekomstige toepassingen

Voor de toekomstige toepassingen voor monitoren en detecteren zijn toepassingen geselecteerd die gebruik maken van nieuwe technieken en die voortbouwen op reeds ontwikkelde toepassingen.

Voorspellen van de duur van een incident

Rijkswaterstaat heeft een systeem ontwikkeld wat de kans op een incident kan voorspellen. Deze informatie wordt gebruikt om 'hotspots' te identificeren waar de kans op incidenten hoog is vergeleken met andere locaties. Deze informatie wordt gebruikt om weginspecteurs zodanig te positioneren dat ze zich vaak in de omgeving van potentiële incidenten bevinden. Als volgende stap in dit proces is het relevant om te kijken naar het voorspellen van de tijdsduur van incidenten. Daarnaast kan mogelijk voorspeld worden hoe de effecten propageren in tijd en ruimte. Dit laat zien waar mensen mogelijk hinder gaan ondervinden, en ook waar maatregelen of routeadviezen nuttig zijn. Voor het

maken van een voorspelmodel kan gebruikgemaakt worden van lineaire regressiemodellen, maar ook van meer geavanceerde technieken zoals decision trees en neurale netwerken.

Het resulterende systeem dient ter ondersteuning van de wegininspecteur. Zo kan getoond worden wat de verwachte duur van een incident is, maar ook waarom het systeem dit verwacht. Op deze manier kan de wegininspecteur informatie uit het systeem gebruiken als onderbouwing van de beslissingen, en het ondersteunt de wegininspecteur bij het maken van deze beslissingen. De wegininspecteur zal nog steeds de beslissingen moeten nemen en de uitkomsten van het systeem moeten beoordelen. Over het algemeen leiden dit soort tools tot meer inzicht in de factoren die van invloed zijn op de duur van een incident. Daarnaast wordt momenteel de inschatting van de duur van een incident gemaakt door de wegininspecteur zodra deze ter plaatse is bij een incident. Met dit systeem zou het mogelijk zijn om al een indicatie van de duur te krijgen voordat de inspecteur ter plaatse is. Het is dus belangrijk om de wegininspecteur te betrekken in de ontwikkeling van het model.

Voorbeelden van data en informatie die het voorspellingsmodel kunnen voeden zijn: data over historische incidenten en de nasleep, data van lusedetectoren, beeldstanden, ambulance(s) ter plaatse, evenementen in de omgeving, en het weer. Context informatie over de omgeving, zoals evenementen, kan ook belangrijk zijn, omdat het bijvoorbeeld belangrijker is om bij een incident na een evenement in (bijvoorbeeld) de ArenA in te grijpen, dan op zondagochtend om 4.00 terwijl het rustig is. Sneller handelen kan dan de ergste effecten wellicht voorkomen.

Het trainen van een model op incidenten is een uitdaging, omdat incidenten doorgaans niet veel voorkomen en ontstaan door een zeer specifieke situatie. Incidenten in historische data kunnen dus erg van elkaar verschillen. Omdat een dergelijk model getraind is op historische data, is het belangrijk dat het aangeeft wanneer het een situatie niet herkent. Sommige types incidenten zullen van een zodanig andere aard zijn, en niet aanwezig in de historische data, dat het maken van een voorspelling niet goed gedaan kan worden door het model. Het model moet zich dus bewust zijn van de eigen beperkingen, zodat in dergelijke situaties een expertschatting gemaakt kan worden.

Een mogelijke uitdaging bij het ontwikkelen van het model kan zijn dat de informatie over de incidenten die geregistreerd zijn in de data niet compleet zijn. Er moet voldoende data over voldoende incidenten zijn om het model goed te trainen. Daarnaast kan het lastig zijn om de contextuele informatie te koppelen aan de incidenten, terwijl deze contextuele informatie wel veel invloed heeft op de afwikkeling van verkeer bij een incident. In het algemeen is AI goed in staat om grote patronen van intensiteiten, zoals file, te voorspellen. Het is echter lastiger om heel nauwkeurig te zijn en het voorspellen van incidenten en de duur ervan kan een uitdaging zijn.

Bij de evaluatie van het systeem is het belangrijk om te bestuderen in hoeverre de voorspellingen van het systeem een verbetering zijn ten opzichte van de inschattingen van de wegininspecteurs. Dit kan reeds gedaan worden tijdens de ontwikkeling van het systeem, op basis van historische data en de bijbehorende inschattingen die door wegininspecteurs gemaakt zijn.

De verwachting van de deelnemers van de workshop is dat het mogelijk zal zijn om deze toepassing binnen 5 jaar in werking te stellen. Het is een logische vervolgstap aan het voorgaande werk van Rijkswaterstaat, en de toegevoegde waarde is duidelijk.

Monitoren van netwerktoestand met data afkomstig van meerdere partijen

Er zijn diverse partijen die binnen een stad of gebied data verzamelen waarmee wellicht gezamenlijk tot betere modellen en conclusies gekomen kan worden. Deze partijen zijn niet altijd bereid om deze data te delen, zodat er met deze samengevoegde data een model gemaakt kan worden. Een nieuwe trend is de ontwikkeling van federated learning technieken waarbij je, zonder de data te delen, tot één model kan komen dat is getraind op alle databronnen.

Het idee is dat één model circuleert tussen partijen en deze partijen trainen het model met hun eigen data verder. Een bekende toepassing buiten verkeersmanagement is in ziekenhuizen, waarbij in ieder ziekenhuis het model afzonderlijk verder getraind kan worden om bijvoorbeeld het risico op diabetes in te schatten op basis van patiëntdata. Door het model te laten circuleren is het niet noodzakelijk om de gevoelige patiëntdata te delen. Binnen verkeersmanagement kunnen een aantal denkrichtingen gevormd worden waar een oplossing met federated learning kansrijk is en waarbij data delen gevoelig ligt. Deze toepassingen zijn hieronder als eerste schets uitgewerkt.

Binnen steden zijn steeds vaker verschillende partijen aanwezig die een vorm van (micro-)mobiliteit of Mobility as a Service (MaaS) aanbieden, zoals aanbieders van deelscooters en deelfietsen. Deze aanbieders verzamelen bijvoorbeeld informatie over gebruikers en ritten. Aangezien deze informatie privacygevoelig is en bovendien vaak belangrijk is voor de business-case van deze aanbieders, zijn deze partijen niet bereid om de data te delen. Het verzamelen van gelijksoortige informatie door meerdere partijen, eventueel op meerdere locaties, stelt deze partijen in staat om gezamenlijk meer verbanden en lessen uit de informatie te halen. Federated learning zou mogelijk gebruik kunnen worden om modellen te maken over MaaS gebruik aan de hand van informatie over ritten, zonder dat deze ritinformatie expliciet wordt gedeeld met alle partijen.

Makers van navigatiesystemen en apps met routeadvies beschikken over veel informatie. Vaak verzamelen zij zelf al informatie over de actuele snelheden of het aantal reizigers op een traject, zodanig dat de inschatting van reistijd en geschatte aankomsttijd verbeterd kan worden. Wanneer informatie van verschillende partijen gecombineerd kan worden, zouden de schattingen verbeterd kunnen worden.

Bij het instellen van milieuzones zou federated learning gebruikt kunnen worden om bijvoorbeeld een limiet aan emissies door vrachtverkeer niet te overschrijden. Data van logistieke bedrijven over de ritten die zij binnen de milieuzone gepland hebben, zou dan gedeeld kunnen worden met een centrale partij zoals de gemeente. Op basis van het aantal verwachte ritten en de spreiding van deze ritten over de tijd, kan dan een besluit genomen worden over de toegestane ritten binnen de milieuzone.

Bij federated learning is het van belang dat de toegevoegde waarde van het samenvoegen van de data voor alle partijen duidelijk is. Hiervoor moet een gezamenlijk doel opgesteld worden waarvoor het model gebruikt wordt. Wanneer de meerwaarde duidelijk is voor iedere partij, zullen zij hopelijk hun bezwaren voor het delen van de informatie (zelfs in geaggregeerde vorm) opzij schuiven. Het is mogelijk dat het grootste deel van de data bij bepaalde toepassingen bij een enkele partij ligt. In zo'n geval is het extra belangrijk dat de toegevoegde waarde voor iedere partij duidelijk is. Bij sommige toepassingen zou het ook mogelijk zijn om het leveren van data als voorwaarde te stellen, bijvoorbeeld bij het inrijden van een milieuzone.

2.3. Samenvatting

Bij het monitoren van verkeer biedt AI diverse mogelijkheden om meer informatie af te leiden uit verzamelde data en het ondersteunt de mens door processen te vereenvoudigen of zelfs automatiseren. In veel gevallen wordt data verzameld op basis van foto's of videomateriaal, waarbij convolutional neural networks gebruikt kunnen worden om uitspraken te doen over beelden. Deze technieken zijn de laatste jaren steeds geavanceerder geworden, wat op dit moment nieuwe toepassingen mogelijk maakt. Een belangrijke voorwaarde bij het construeren van voorspelmodellen op basis van foto's of videomateriaal is dat er in de meeste gevallen vooraf door de mens gelabeld moet worden wat er op de beelden te zien is. Daarnaast is het in alle gevallen belangrijk dat er voortdurend gemonitord moet worden of modellen goed in staat zijn om (bijvoorbeeld) objecten op foto's te herkennen, niet alleen tijdens de ontwikkeling van het systeem. Tot slot biedt AI kansen om te kunnen monitoren aan de hand van privacygevoelige data die wordt verzameld door verschillende partijen, zonder deze data te delen. Vaak stuit toepassing van techniek waarbij individuele personen gevolgd kunnen worden op weerstand en het is dus belangrijk dat er goed gecommuniceerd wordt over de manier waarop de data gebruikt en opgeslagen wordt. Daarnaast is het nodig dat deze toepassingen voldoen aan de wettelijke regelgeving zoals AVG.

3. Informeren, adviseren en waarschuwen

Informeren, adviseren en waarschuwen gaat over informatieoverdracht naar de weggebruiker, of naar de verkeerscentrale. Dit kan in de vorm van informatie, maar kan dus ook een advies of een waarschuwing zijn. Toepassingen die hierbij passen zijn routeinformatie, snelheidsadviezen en filestaartbeveiliging. AI biedt kansen om weggebruikers beter te informeren, adviseren en waarschuwen op basis van meerdere databronnen. Op het moment dat meerdere databronnen worden gecombineerd, wordt het mogelijk om meer accuraat te voorspellen, wat vervolgens kan leiden tot meer accurate informatie die wordt gepresenteerd aan de weggebruikers.

3.1. Huidige toepassingen

De huidige toepassingen voor informeren, adviseren en waarschuwen focussen voornamelijk op het informeren en adviseren. Bijvoorbeeld met informatie over verwachte reistijden, congestie, en brugopeningen.

Snelheidsadviezen voor betere doorstroming

In het Brabant In-Car programma zijn diverse experimenten uitgevoerd met in-car technieken om het gedrag van weggebruikers te beïnvloeden. Hierbij kregen weggebruikers gepersonaliseerde informatie via een smartphone of navigatiesysteem tijdens het rijden op de A67. Een van de uitgevoerde projecten uit het Brabant In-Car programma is Smoover. Tijdens dit project is een navigatieapplicatie voor smartphones ontwikkeld waarmee weggebruikers snelheidsadviezen kregen met als doel om de doorstroming op de A67 te verbeteren. De achterliggende systemen van Smoover maakten gebruik van twee AI-technieken. Er werd deep learning gebruikt om verkeersvoorspellingen te doen op basis van historische data en real-time gegevens van de A67. Deze voorspellingen maakten het mogelijk om proactieve snelheidsadviezen te geven, gebaseerd op de verwachte situatie op de weg. Verder werd gebruikgemaakt van reinforcement learning om tijdens simulaties te leren welke snelheidsadviezen een positief effect hebben op de doorstroming. Reinforcement learning heeft in deze toepassing ook de potentie om de snelheidsadviezen adaptief te maken, waarbij het systeem zelf leert om steeds beter te worden. Beide AI-componenten zijn geïntegreerd in het systeem en in 2014 met een kleine groep deelnemers getest op de A67 (Smoover, 2015).

Routeadviezen om files te vermijden en voorkomen

In het Europese project Socrates 2.0 zijn verkeersvoorspellingen gebruikt om betere routes te adviseren aan weggebruikers (Huisken, 2020). In het project zijn er systemen ontwikkeld die proactieve adviezen geven. Het doel hiervan is niet alleen om bestaande files te ontwijken, maar ook om files die in de toekomst verwacht worden te voorkomen. Hierbij wordt real-time data gecombineerd met historische data om te berekenen wat de kans op congestie is op een specifieke locatie in de nabije toekomst. Als deze kans hoog is, worden er alternatieve routes aangeboden aan weggebruikers. Voor de voorspellingen wordt gebruikgemaakt van machine learning, maar verdere details zijn op het moment van schrijven niet bekend. Tussen december 2019 en de zomer van 2020 is dit systeem

getest in de regio Amsterdam. Als gevolg van COVID-19 waren er tijdens de test minder files dan gebruikelijk, en daardoor konden er nog geen betrouwbare conclusies worden getrokken over de effecten op het verkeer.

Reizigers informeren over opening van brug

De Botlekbrug en Spijkenisserbrug openen regelmatig voor scheepvaart op de Oude Maas, met extra reistijd op de weg tot gevolg. Rijkswaterstaat heeft samen met Technolution een systeem ontwikkeld om de opening van de brug te voorspellen, zodat weggebruikers beter worden geïnformeerd en alternatieve routes beter kunnen worden benut. Het systeem gebruikt informatie die door schepen wordt uitgezonden om te voorspellen of de brug in de nabije toekomst zal openen. Hierbij wordt gebruikgemaakt van de snelheid van het schip en de afstand tot de bruggen. Als de kans op opening toeneemt wordt de boodschap 'geen opening verwacht' op dynamische route informatiepanelen vervangen door 'opening verwacht', zodat weggebruikers proactief worden geïnformeerd en zij kunnen besluiten om eventueel een alternatieve route te kiezen. Verdere details over de achterliggende algoritmes zijn op het moment van schrijven niet bekend. Het systeem is begin 2020 gedurende 6 maanden getest in de praktijk. Met betrekking tot de voorspellingen is gebleken dat de boodschap 'geen opening verwacht' op de informatiepanelen betrouwbaarder is dan de boodschap 'opening verwacht'. Dit wordt veroorzaakt doordat de exacte routes van schepen op de Nieuwe Waterweg moeilijk te voorspellen is.

Verbeterde verwachte aankomsttijd

Onderzoekers van DeepMind hebben in samenwerking met Google een verbetering gemaakt voor de verwachte aankomsttijd (Estimated Time of Arrival, ETA) in Google Maps (Lange & Perez, 2020). Verkeersvoorspellingen spelen een belangrijke rol in diverse toepassingen en kunnen in veel gevallen gezien worden als onderliggende data op basis waarvan beslissingen worden genomen. Als er wordt voorspeld dat het op een specifieke locatie in een stad druk wordt over 60 minuten, dan kan dit bijvoorbeeld aanleiding zijn om mensen andere routes te adviseren.

Google Maps maakt normaal gesproken gebruik van de real-time verkeersdata voor wegvakken om in te schatten hoe lang een reis duurt. Daarbij werd echter nog niet meegenomen wat de verwachting is ten aanzien van de afwikkeling van het verkeer gedurende de reis. Bij 97 procent van de reizen waren de bestaande schattingen van de aankomsttijd al accuraat en door rekening te houden met de verwachte situatie op de weg is dit nog verder verhoogd. De verwachte ontwikkeling van het verkeer wordt bepaald met behulp van een graph neural network. Neurale netwerken zijn een veelgebruikt gereedschap bij het genereren van voorspellingen op basis van data. Graph neural networks maken het mogelijk om betere voorspellingen te genereren in domeinen waar de data gestructureerd kan worden als een graaf. Dit maakt het uitermate geschikt om toe te passen op een verkeersnetwerk. Hierbij is historische data gebruikt om een wegnetwerk in 'supersegmenten' te verdelen die een grote hoeveelheid verkeersvolume delen. Deze 'supersegmenten' vinden een plaats in het graph neural network, wat vervolgens in combinatie met actuele data tot een inschatting van de verwachte aankomsttijd leidt. Deze ontwikkelingen laten ook zien dat het integreren van domeinkennis (in dit

geval de structuur van het wegennetwerk) in AI-modellen kan leiden tot betere voorspellingen vergeleken met generieke modellen die geen gebruikmaken van expliciete kennis over het domein (Lange & Perez, 2020).

3.2. Toekomstige toepassingen

Voor de toekomstige toepassingen zijn toepassingen geselecteerd die gebaseerd zijn op nieuwe technieken, zoals graph neural networks, en verder bouwen op bestaande algoritmes. Beide toepassingen focussen op het adviseren van de verkeerscentrale en weggebruikers.

Reistijden voorspellen en routes adviseren

Graph neural networks zijn relatief nieuwe modellen waarbij een graaf-structuur als invoer wordt gebruikt van een neurale netwerk. Tijdens het trainen leert het neurale netwerk wat de afhankelijkheden zijn tussen de locaties in de graaf. In de context van verkeersmanagement is het interessant om te kijken welke potentie dit soort modellen hebben. Het is bijvoorbeeld mogelijk om netwerkbreed te voorspellen, in plaats van voorspellen voor één individuele locatie, omdat afhankelijkheden tussen locaties gemakkelijker meegenomen kunnen worden. Daarnaast kan er contextinformatie worden meegenomen, zoals de aanwezigheid van evenementen. Hiermee kan bijvoorbeeld inzicht worden verkregen over de invloed van een voetbalwedstrijd in de ArenA op het verkeer in Amsterdam Noord 30 minuten later. Vooral wanneer er incidenten zijn, is er baat bij een betere voorspelling van de netwerktoestand.

Momenteel worden verkeersverwachtingen opgesteld door de verkeerscentrale. Daarbij wordt informatie gebruikt over welke factoren de situatie op de weg beïnvloeden. Bijvoorbeeld, dat er de dag na de zomervakantie vaak veel file staat, of dat de eerste regenval in langere tijd problemen kan veroorzaken. Idealiter zouden deze factoren meegenomen worden in een graph neural network. Verder zou zo'n model in overleg met de verkeerscentrale ontworpen worden, en zou het model ook als ondersteuning van de verkeerscentrale dienen.

De verbeterde netwerkbrede monitoring kan voor verschillende doeleinden gebruikt worden. Allereerst kan het dienen als monitoringsinstrument voor de verkeerscentrale. Zij kunnen hierbij gewaarschuwd worden bij situaties die afwijken van een normale situatie. Daarop kunnen zij maatregelen toepassen in het netwerk om de situatie te verbeteren. De toegevoegde waarde van het model is dat er constant gemonitord kan worden en dat er constant geüpdatete informatie mee kan worden genomen. Daarnaast kunnen voorspellingen afkomstig uit (graph) neural networks als invoer gebruikt worden bij het genereren van routeadviezen die aan individuele weggebruikers worden gegeven. Hierbij zouden adviezen gegeven kunnen worden die goed zijn voor het algemeen belang, zoals routes die niet langs scholen gaan, of niet langs een kwetsbaar punt in het netwerk zoals een brug wanneer het al druk is. Hierbij is de afweging tussen voordeel voor een reiziger en voordeel voor het collectief een lastige balans.

Bij het gebruiken van graph neural networks kan tijdens het leren direct rekening gehouden worden met de structuur van een graaf, waardoor een contextuele representatie van de data gemaakt kan worden. Het is hiervoor belangrijk om goed na te denken over de manier waarop de data geprojecteerd wordt op de graaf. Er zijn bijvoorbeeld meerdere manieren mogelijk om een wegennet op te delen in segmenten en de gekozen manier heeft invloed op de werking van het graph neural network. De schaalbaarheid van graph neural networks naar grotere verkeersnetwerken is een open uitdaging.

Inzicht in het opvolgedrag van de routeadviezen is erg belangrijk. Om gedrag te beïnvloeden is het goed om te bestuderen hoe bepaalde prikkels, zoals adviezen, het verkeer veranderen. Hiervoor is het nodig om meerdere datasets bij elkaar te brengen. Het opvolgedrag kan gemeten worden door historische routeadviezen bij te houden en in de data te kijken of mensen die adviezen hebben opgevolgd. Om beter opvolgedrag te realiseren, is het nuttig om naast het advies zelf ook een uitleg te genereren, waarmee de weggebruiker meer inzicht krijgt over de achterliggende reden van het advies. Een simpel voorbeeld is het adviseren van een andere route en de toevoeging dat het verkeer op deze route beter doorstroomt, waardoor er rustiger doorgereden kan worden en de reiziger maar 5 minuten later thuis is. Een andere toevoeging kan zijn dat de weggebruiker met het volgen van de route bijdraagt aan de veiligheid rondom een school. Het extraheren van dit soort informatie uit voorspelmodellen is een open uitdaging.

Tegengaan van schokgolven

Er bestaan algoritmes zoals SPECIALIST (Hegyí et al., 2008) en COSCAL (Mahajan et al., 2015) die op basis van verkeersstroomtheorie schokgolven tegengaan. Hierbij worden snelheidslimieten bepaald die stroomopwaarts de verkeersstroom afknijpen en hiermee worden de schokgolven tegengewerkt. Soms zijn er stroomopwaarts dan nog extra maatregelen nodig, omdat daar een hoge dichtheid aan verkeer ontstaat. Met AI zouden algoritmes gemaakt kunnen worden die de schokgolven tegengaan en ook de ongewenste effecten verminderen. Een mogelijke AI-technologie is reinforcement learning, die leert hoe het verkeer zo goed mogelijk 'afgeknepen' kan worden. Een beloningsfunctie in reinforcement learning zou hierbij uitgedrukt kunnen worden in voertuigverliesuren, zodat het systeem leert om congestie te voorkomen.

Het is de verwachting dat AI op een aantal manieren kan bijdragen aan de verbetering van de algoritmes. Allereerst is het wellicht mogelijk om met reinforcement learning betere beslisregels af te leiden. Bijvoorbeeld regels waarbij de reductie van snelheid tot 60 kilometer per uur niet nodig is, maar een kleinere reductie wellicht ook voldoende is. Ook het activeren van het systeem kan mogelijk verbeterd worden. In veel gevallen wordt het systeem niet geactiveerd, terwijl er wel schokgolven zijn. De condities waarmee het systeem aan gaat zijn streng en worden op dit moment vaak niet behaald. Wanneer dit gecorrigeerd wordt, moet wel opgepast worden dat de drempel van activatie niet te laag wordt ingesteld. Als het systeem bij iedere kleine verstoring in verkeersstroom aanslaat, verliest het zijn geloofwaardigheid. Bovendien wordt op het moment van activeren meteen bepaald hoe de ingreep er uit gaat zien. Wanneer dit meer dynamisch gedaan kan worden en ook tijdens de ingreep nog bijgestuurd kan worden op basis van de reactie van het verkeer, kan wellicht een betere prestatie voor het systeem behaald worden.

Wel is het belangrijk dat het zelflerende systeem niet start zonder kennis. De huidige algoritmes kunnen als basiskennis geïmplementeerd worden, van waaruit het systeem kan proberen om te verbeteren. Ook moeten er bepaalde veiligheidsbeperkingen aan het algoritme opgelegd worden, zodat het systeem geen ongewenst gedrag gaat vertonen, zoals het constant veranderen van snelheidslimieten. Nieuwe ontwikkelingen op het gebied van safe reinforcement learning kunnen hierbij uitkomst bieden. Voordat een dergelijk (vernieuwd) systeem op de weg geplaatst kan worden, is het noodzakelijk om aan te tonen wat de toegevoegde waarde is in verschillende verkeerssituaties, ook ten opzichte van de bestaande systemen. Dit kan gedaan worden in simulaties.

Het algoritme kan ontwikkeld worden om te werken met data uit lusdetectoren, maar data met meer detail zoals floating car data, kan het algoritme in staat stellen om betere beslisregels te ontwikkelen. De verwachting is dat AI-technieken bij kunnen dragen aan het tegenwerken van schokgolven, waarbij minder ruimte nodig is en meer dynamisch gestuurd kan worden. Het is dan ook mogelijk om dit op meer plaatsen en in meer verschillende situaties te implementeren. Echter, de implementatie van dergelijke systemen zonder AI is in het verleden al lastig gebleken en daarom is het niet waarschijnlijk dat een AI-gestuurd systeem voor schokgolfdemping op korte termijn in de praktijk tot toepassing komt.

3.3. Samenvatting

AI-gebaseerde toepassingen voor informeren, adviseren en waarschuwen bestaan in veel gevallen uit twee fases. In de eerste fase wordt op basis van data inzichten gegenereerd, of verkeer voorspeld. Dit dient als input voor de tweede fase, waarin bepaald wordt welke informatie, adviezen of waarschuwingen worden gepresenteerd aan de weggebruiker. AI biedt hierbij kansen, omdat het mogelijk wordt om proactief informatie te presenteren aan weggebruikers, in plaats van reactief. De verwachting is dat nieuwe ontwikkelingen op het gebied van machine learning zoals graph neural networks het mogelijk maken om dit meer netwerkbreed te kunnen doen.

4. Sturen en regelen

Bij sturen en regelen wordt ingegrepen in de manier waarop verkeer wordt gestuurd, zodanig dat bijvoorbeeld de doorstroming van het verkeer wordt geoptimaliseerd. Toepassingen die hierbij passen zijn het verlagen van de snelheidslimiet of het openen en sluiten van een rijstrook. Het sturen en regelen kan ook door modellen gedaan worden. AI-methodes kunnen in dergelijke toepassingen vooral een rol spelen bij het nemen van beslissingen om verkeer bij te sturen, zonder directe tussenkomst van de mens.

4.1. Huidige toepassingen

Het aansturen van verkeerslichten en het optimaliseren van kruispunten is een duidelijke toepassing van sturen en regelen. Hiervan zijn meerdere voorbeelden gevonden die al toegepast zijn. Maar er zijn ook andere beslissingen die met AI eenvoudiger of beter gemaakt worden.

Adaptieve verkeerslichten

AI wordt ook gebruikt om te sturen met behulp van de bestaande infrastructuur. AI-algoritmes worden bijvoorbeeld gebruikt om te bepalen wanneer en hoelang verkeerslichten op groen gaan in een gebied met meerdere kruispunten. SURTRAC is een systeem waarmee voor een specifiek kruispunt wordt gepland hoe de verkeerslichten worden aangestuurd, op basis van informatie over naderende voertuigen (Smith et al., 2013). De informatie van een kruispunt wordt vervolgens gecommuniceerd naar kruispunten in de omgeving, zodat er tijdens de planning rekening gehouden kan worden met informatie van kruispunten in de omgeving. SURTRAC maakt gebruik van AI-gebaseerde planning en scheduling, en kan worden gezien als een 'online' controller die voortdurend optimaliseert zodra er nieuwe informatie binnenkomt. SURTRAC kan worden gezien als een multi-agentsysteem, waarin meerdere autonome agenten slim gedrag vertonen en samenwerken. Dit is een vakgebied op het snijvlak van artificial intelligence, optimalisering en operations research. SURTRAC maakt gebruik van camera's om naderende voertuigen te detecteren. SURTRAC is getest op 9 kruispunten in Pittsburgh (Pennsylvania, Verenigde Staten), en vergeleken met een referentiecontroller die niet voortdurend optimaliseert bij het ontvangen van nieuwe informatie. De resultaten laten zien dat er gemiddeld 26 procent reistijd kan worden bespaard en de uitstoot werd tijdens de test met 21 procent verminderd. Daarnaast bleek dat mensen gemiddeld met een hogere snelheid konden rijden, en het was minder vaak noodzakelijk om te stoppen.

Slimme verkeerslichten

VivaCity gebruikt de data die zij verzamelen (zie paragraaf 2.1) ook voor een toepassing met verkeerslichten. Hierbij gebruiken ze de verzamelde data om met reinforcement learning de algoritmes te ontwikkelen. Het algoritme wordt getraind door veel simulaties te draaien op basis van de historische data. In deze simulaties worden dan de verkeerslichten aangestuurd, waarvan het algoritme leert. Het feit dat VivaCity over data van hoge kwaliteit beschikt, zorgt ervoor dat het algoritme ook voor verschillende soorten weggebruikers aangepast kan worden, bijvoorbeeld wanneer de actieve

modaliteiten (fietsen, lopen) toenemen. De verkeerslichten reageren hiermee sneller op de huidige verkeersomstandigheden dan verkeerslichten zonder deze AI-toevoeging. De verkeerslichten zijn geïmplementeerd in Manchester (Vivacity Labs, 2020).

Bepalen van posities weginsecteurs

Weginsecteurs worden ingezet bij meldingen van incidenten en zorgen voor het waarborgen van de veiligheid en een goede doorstromingen. Bij een incident kan het gaan om een ongeval, maar ook een steen op de vluchtstrook die verwijderd moet worden of een pechgeval. Weginspecteurs worden ingezet binnen een specifiek gebied en krijgen meldingen door vanuit de verkeerscentrale. Hierbij is het belangrijk dat weginsecteurs snel ter plaatse kunnen zijn, omdat het snel oplossen van problemen zorgt voor minder filevorming en dus ook minder voertuigverliesuren. Rijkswaterstaat maakt sinds kort gebruik van een nieuw systeem waarmee de positie van weginsecteurs wordt geoptimaliseerd aan de hand van voorspellingen over incidenten, met als doel om de aanrijtijd van weginsecteurs bij incidenten te verlagen. Dit proces bestaat uit twee stappen. In de eerste stap wordt een Bayesiaans model gebruikt dat de kans op een incident voorspelt. Dit model wordt geschat met behulp van data over historische incidenten uit een heel jaar. Hierbij gaat het naast informatie over het incident zelf ook om contextinformatie zoals de dag van de week, het tijdstip en het weer. De voorspellingen maken het mogelijk om 'hotspots' te identificeren, waar de kans op incidenten hoog is vergeleken met andere locaties. In de tweede stap worden de voorspellingen gebruikt om de posities van weginsecteurs te optimaliseren, waarbij het belangrijk is dat weginsecteurs in de omgeving zijn van locaties waar het voorspelmodel een relatief hoge kans op incidenten voorspelt. Tenslotte wordt deze informatie doorgegeven aan de weginsecteurs en kunnen zij herpositioneren.

Het systeem is op dit moment actief in de regio Midden-Nederland en wordt binnenkort ook ingezet voor Zuidwest-Nederland. Voor de uitrol van het systeem was de gemiddelde aanrijtijd 18 minuten (gemeten over 24 uur) en na de uitrol van het systeem was dit 14 minuten. Op het moment van schrijven is het nog niet duidelijk of deze verlaging is gerealiseerd door de optimalisatie door het systeem. Het is ook mogelijk dat een gewijzigde manier van werken voor weginsecteurs heeft gezorgd voor een lagere aanrijtijd, omdat zij nu informatie krijgen via een tablet met daarbij informatie over de positie van collega's. Dit wordt in de toekomst verder bestudeerd.

4.2. Toekomstige toepassingen

Voor de toekomstige toepassingen is gekozen voor een uitbreiding van het gebruiken van AI voor verkeersregelininstallaties. Daarnaast is gekeken naar het instellen van een inhaalverbod voor vrachtverkeer op basis van effectiviteit in het verleden.

Zelflerende verkeersregelininstallaties en regelsystemen

Reinforcement learning methodes zijn in staat om computersystemen te laten leren hoe ze een taak zo goed mogelijk kunnen uitvoeren. Daarnaast kan het gebruikt worden om een reeds geïnstalleerd

systeem zichzelf te laten aanpassen aan een nieuwe situatie. Als verkeersregelinstallaties of installaties voor toeritdosering in staat zijn om voortdurend te leren, dan is de verwachting dat dit zorgt voor systemen die het verkeer beter aansturen dan een statisch systeem dat niet zelflerend is. Dit kan bijvoorbeeld zorgen voor betere doorstroming op een kruispunt en verbeterde leefbaarheid.

De knoppen waaraan gedraaid kan worden, zijn bijvoorbeeld de duur van een cyclus. Dat is de tijd die het duurt om in een verkeersregelprogramma alle richtingen groen te geven. Daarnaast kan gevarieerd worden welke richtingen tegelijk groen krijgen en de volgorde van de richtingen die groen krijgen. Ook de groentijd, de tijd dat een richting of set richtingen groen krijgt, kan gevarieerd worden. Tegelijkertijd zijn er beperkingen waar rekening mee gehouden moet worden. De voornaamste functie van een verkeersregelinstallatie is veiligheid en het scheiden van verkeer in tijd en ruimte. Daarmee kunnen bepaalde richtingen niet tegelijk groen krijgen. Ook de maximale of minimale tijd die een fase nodig heeft (denk aan de geeltijd), is een beperking.

Er zijn al partijen die zich bezighouden met het gebruiken van AI voor verkeersregelinstallaties. Hierbij worden de computerprogramma's die de installaties draaien geoptimaliseerd met behulp van AI. Een mogelijke verbetering zou zijn om het programma seizoens- of tijdsafhankelijk te maken, of zelfs op een situatie te laten reageren. Hiermee kan bijvoorbeeld een route waar veel verkeer rijdt, bijvoorbeeld vanaf een stadion bij een concert, meer groentijd krijgen. Met het zelflerende aspect kan bovendien ook steeds geoptimaliseerd worden. Bijvoorbeeld bij de aanbouw van een nieuwbouwwijk, waar steeds meer bewoners komen wonen en dus steeds meer verkeer ontstaat, zou deze richting via de zelflerende functie van de verkeersregelinstallatie automatisch meer groentijd krijgen.

Hoewel de verwachte successen van intelligente verkeersregelinstallaties nog enigszins uitblijven, is het nog steeds de verwachting dat met meer informatie over de positie en snelheid van aanrijdende voertuigen een betere doorstroming bereikt kan worden. Nieuwe databronnen zoals floating car data en beelden van videosensoren kunnen hierbij helpen. Een mogelijke aanvulling is het onderscheiden van verschillende soorten weggebruikers of voertuigtypen. Hiermee zouden bijvoorbeeld schoolgaande kinderen op de fiets meer groentijd kunnen krijgen, of zware vrachtwagens minder hoeven te stoppen om emissies te verlagen.

Het trainen van de verkeersregelinstallaties kan gebeuren op basis van historische data in combinatie met simulatie. Reinforcement learning gebeurt door middel van het evalueren van willekeurige acties en kan dus niet direct in de praktijk getest worden. Met de ontwikkeling van safe reinforcement technieken, waarbij binnen bepaalde kaders willekeurige acties gedefinieerd worden, zou dit misschien in de toekomst wel mogelijk zijn.

Om dit soort systemen schaalbaar in te kunnen zetten in de praktijk, is het belangrijk dat de systemen zichzelf kunnen configureren voor een specifieke situatie. Dit voorkomt dat de mens herhaaldelijk systemen moet instellen voor nieuwe situaties. Bij het regelmatig aanpassen van het programma van een verkeersregelinstallatie, is het belangrijk om rekening te houden met verwachtingen. Reizigers die een kruispunt regelmatig passeren, zullen op een gegeven moment opmerken na

welke richting zij groen krijgen. Wanneer een regeling wordt aangepast zodanig dat dit niet langer waar is, kunnen ongelukken ontstaan als weggebruikers er vanuit gaan dat zij groen krijgen.

Voorspellen of inhaalverbod effectief is

Door een inhaalverbod voor vrachtwagens zijn personenauto's minder genoodzaakt om af te remmen. Hierdoor kan de doorstroming stabiel worden en zal het verkeer minder gauw stagneren. Met camera's is het mogelijk om te monitoren welke voertuigen op welke strook rijden, en wat op dat moment de doorstroming is. Daarnaast is het mogelijk om te monitoren in hoeverre een inhaalverbod voor vrachtverkeer effectief is geweest in het verleden. Door veel data te verzamelen, is het mogelijk om een model te trainen dat voor een gegeven situatie kan voorspellen of een inhaalverbod een positief effect op de doorstroming heeft. Vervolgens kan dit model gebruikt worden om te beslissen of er een inhaalverbod voor vrachtwagens wordt ingesteld.

Bij de ontwikkeling van het systeem zal gebruikgemaakt worden van data afkomstig van lusedetectoren en camerabeelden. Met name het gebruik van camera's kan tot weerstand leiden en het is doorgaans een ingewikkeld proces om meer camera's toe te voegen aan de bestaande infrastructuur. Daarnaast moet er voldoende data beschikbaar zijn uit periodes waarin een inhaalverbod actief was, zodat het systeem in staat is om te leren onder welke omstandigheden zo'n verbod positief effect kan hebben.

Het inhaalverbod kan gecommuniceerd worden via de bestaande infrastructuur, de matrixborden, of via in-carsystemen. Het kan zijn dat het nodig is om extra matrixborden te plaatsen. Een inhaalverbod kan ook gecommuniceerd worden via in-carsystemen, maar daarbij is het noodzakelijk om regelgeving aan te passen. Op dit moment is het niet mogelijk om mensen te verplichten om de informatie die in de auto wordt gepresenteerd op te volgen.

Een dynamisch inhaalverbod is op dit moment enkel getest op de A2. Een factor die het effectief instellen van een inhaalverbod voor vrachtverkeer lastig maakt, is het lage opvolgedrag. Wanneer het verbod beter opgevolgd wordt, kunnen wellicht grotere effecten bereikt worden. Met de komst van zelfrijdende voertuigen in de toekomst zullen de problemen met opvolgedrag opgelost worden, maar dit is op de korte termijn nog niet het geval.

De verwachting is dat een model geconstrueerd kan worden op basis van (convolutional) neural networks, die op basis van beelden en andere informatie kan beoordelen of een inhaalverbod positief effect kan hebben. Bij het trainen van het model is het nodig om onderscheid te maken tussen reguliere congestie en verstoringen die veroorzaakt worden doordat vrachtverkeer inhaalt. Hieruit moet het model namelijk onderscheiden of een vrachtverbod effectief is. Hoe dit afgeleid moet worden uit de data, is nog een open uitdaging.

De uitwerking van deze toepassing berust nog op een aantal onbeantwoorde vragen. Behalve het onderscheid tussen reguliere congestie en congestie veroorzaakt door het inhalen van vrachtwagens,

is het ook nog belangrijk om te onderzoeken welk soort data voldoende informatie bevat over voertuigtypen en posities van voertuigen per strook. Daarom is het goed om als eerste stap te onderzoeken of er een verband gelegd kan worden tussen het inhalen van vrachtwagens en congestie.

4.3. Samenvatting

AI biedt kansen om systemen te ontwikkelen die zelfstandig verkeer kunnen bijsturen, zonder directe tussenkomst van de mens. Een belangrijke toegevoegde waarde hierbij is dat systemen in toenemende mate adaptief gemaakt kunnen worden, zodat systemen zich zelfstandig kunnen aanpassen aan nieuwe situaties. Om implementatie in de praktijk te realiseren, is het belangrijk om te kunnen valideren waarom een systeem een beslissing neemt, wat bij huidige AI-methodes niet altijd eenvoudig is. Daarnaast is het bij het valideren van algoritmes in simulaties belangrijk dat er realistisch gesimuleerd kan worden, rekening houdend met alle variabelen die in een omgeving kunnen afwisselen zoals het weer en het gedrag van voetgangers. Dit is nog steeds een grote uitdaging die, naast het ontwikkelen van de AI-methodes zelf, veel aandacht verdient.

5. Overzicht van toepassingen

De huidige en toekomstige toepassingen van AI in verkeersmanagement worden in kaart gebracht in **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden..** Hierbij zijn de toekomstige toepassingen in het [blauw](#) aangegeven. Op de horizontale as zijn de categorieën van verkeersmanagement uitgesplitst en de verticale as toont de deelgebieden van AI. Als een toepassing gebruikmaakt van technieken uit meerdere deelgebieden dan is de toepassing meerdere keren in de tabel geplaatst.

Tabel 1: Overzicht van huidige en toekomstige toepassingen

	Monitoren en detecteren	Informereren, adviseren en waarschuwen	Sturen en regelen
Machine learning, deep learning	Dataverrijking en meer inzichten afleiden uit data Verkeerslichten optimaliseren met AI Monitoren van netwerktoestand met data afkomstig van meerdere partijen Voorspellen van de duur van een incident	Routeadviezen om files te vermijden en voorkomen Reizigers informeren over opening van brug Verbeterde verwachte aankomsttijd Reistijden voorspellen en routes adviseren	Bepalen van posities weginspecteurs Voorspellen of inhaalverbod effectief is
Natural language processing			
Speech processing			
Computer vision	Detectie van mobiele telefoongebruik achter het stuur met slimme camera's Tellen van fietsers en voetgangers Spitsstroken schouwen met slimme camera's		
Expert systems			

	Monitoren en detecteren	Informereren, adviseren en waarschuwen	Sturen en regelen
Planning, scheduling, control, reinforcement learning		Snelheidsadviezen voor betere doorstroming Tegengaan van schokgolven	Adaptieve verkeerslichten Slimme verkeerslichten Bepalen van posities weginspecteurs Zelflerende verkeersregelin- stallaties en regelsys- temen

Machine learning en computer vision technieken worden voornamelijk ingezet voor het tellen en classificeren van voertuigen, waarbij floating car data en videobeelden als brondata worden gebruikt. In de praktijk is er enige overlap tussen de categorieën, omdat computer vision technieken soms ook gebruikmaken van machine learning. Daarnaast wordt machine learning ingezet voor het genereren van voorspellingen. Deze voorspellingen vormen in veel gevallen de basis van een groter systeem. Routeadviezen of informatie over reistijden kunnen bijvoorbeeld worden berekend aan de hand van voorspellingen. Algoritmes voor planning, scheduling en control worden ingezet op het moment dat systemen zelfstandig moeten beslissen wat het systeem moet doen, zoals bijvoorbeeld het geven van een snelheidsadvies of het aansturen van een verkeerslicht.

Er zijn tijdens de quick scan geen al bestaande toepassingen gevonden en geen toekomstige toepassingen bedacht van natural language processing, speech processing en expert systems. Omdat de huidige toepassingen via een quick scan zijn verzameld, is het mogelijk dat de tabel geen uitputtend overzicht geeft van alle bestaande toepassingen.

Het is duidelijk uit dit overzicht dat sommige combinaties van verkeersmanagementfuncties en AI-deelgebieden minder voor de hand liggen. Dit betekent niet dat het niet mogelijk is om een toepassing te ontwikkelen die in één van deze lege cellen valt, maar het vullen van de cellen zou geen doel op zich moeten zijn. Het is belangrijk dat een passende AI-techniek gekozen wordt op basis van de vereisten voor de techniek die uit de toepassing volgen.

6. Conclusie en aanbevelingen

Artificial Intelligence staat momenteel in het middelpunt van de belangstelling en wordt gezien als een collectie van technieken die in diverse domeinen nieuwe toepassingen mogelijk maakt waarin mensen worden ondersteund, of waarin processen volledig worden geautomatiseerd. TNO en Rijkswaterstaat hebben een TrafficQuest Challenge uitgevoerd om de potentie van deze technieken voor verkeersmanagement in kaart te brengen.

Bij het **monitoren van verkeer** zorgen nieuwe ontwikkelingen op het gebied van AI ervoor dat er meer gegevens kunnen worden afgeleid uit bestaande data en nieuwe databronnen zoals camera-beelden. In de afgelopen jaren zijn er veel ontwikkelingen geweest op het gebied van convolutional neural networks die kunnen leren aan de hand van beelden en dit maakt op korte termijn nieuwe toepassingen voor monitoring mogelijk die voorheen moeilijk realiseerbaar waren, zoals het automatisch herkennen van objecten op beelden. Daarnaast liggen er kansen voor de toekomst om meer netwerkbreed te gaan voorspellen. En ontwikkelingen op het gebied van federated learning hebben de potentie om inzichten te verkrijgen uit privacygevoelige of bedrijfsgevoelige mobiliteitsdata afkomstig van meerdere partijen.

Voor het **informereren, adviseren en waarschuwen** biedt AI kansen om proactief informatie aan te bieden aan weggebruikers. Toepassingen bestaan in veel gevallen uit twee fases, waarin eerst AI wordt gebruikt om te voorspellen en in een tweede stap wordt aan de hand van deze voorspellingen besloten welke informatie aan de weggebruikers wordt gegeven, zoals bijvoorbeeld het advies om een andere route te nemen. Voor weggebruikers kan het relevant zijn om te weten waarom specifieke adviezen worden gegeven, bijvoorbeeld om beter opvolgedrag te realiseren. De verwachting is dat nieuwe technieken op het gebied van uitlegbare AI daar in de komende jaren een bijdrage aan gaan leveren.

Bij het **sturen van verkeer** maakt AI het mogelijk om systemen te ontwikkelen die zelfstandig kunnen beslissen hoe verkeer het beste kan worden bijgestuurd, bijvoorbeeld om doorstroming te verbeteren. Huidige verkeersmanagement systemen kunnen zich meestal niet automatisch aanpassen aan nieuwe situaties. AI-gebaseerde systemen kunnen adaptief gemaakt worden en zijn in staat om voortdurend bij te leren, bijvoorbeeld met reinforcement learning. Dit biedt ook voordelen bij het ontwerp en het ontwikkelen van deze systemen. Zo was het voorheen noodzakelijk om alle beslisseregels voor het sturen van verkeer vooraf te bepalen. AI maakt het in de toekomst mogelijk dat systemen dit zelfstandig leren op basis van het uitvoeren van beslissingen en het observeren van de uitkomsten van deze beslissingen. Dit kan worden ingezet bij verkeersregelininstallaties, maar ook toeritdosering of systemen die beslissen of een inhaalverbod ingesteld wordt.

De huidige toepassingen van AI in verkeersmanagement in dit rapport laten zien dat er in de praktijk momenteel vaak wordt gefocust op het uitvoeren van één specifieke taak (zoals fietsers tellen) aan de hand van een beperkt aantal databronnen (bijvoorbeeld camerabeelden). Dit is een logisch pro-

ces, omdat toepassingen doorgaans incrementeel worden ontwikkeld. In de toekomst is er veel potentie voor AI-gebaseerde toepassingen waarin meerdere databronnen worden gecombineerd, of waarin meerdere complexe taken gecombineerd worden aangepakt. Dit zou er bijvoorbeeld voor kunnen zorgen dat er nieuwe inzichten over verkeer worden afgeleid uit data, die met bestaande methodes en één databron niet direct naar voren komen.

De ontwikkeling van AI-gebaseerde methodes begint met kwalitatief hoogwaardige data en het is daarom van groot belang dat er data beschikbaar is die modellen in staat stelt om bijvoorbeeld accuraat te voorspellen. Momenteel ligt er een sterke focus op de ontwikkeling van AI-technieken, maar het is tegelijkertijd belangrijk om ook te focussen op het verzamelen, voorbereiden en fuseren van gedetailleerde data over verkeer, wat vervolgens dient als brandstof om modellen te laten werken. Hierbij is het ook in toenemende mate belangrijk om rekening te houden met privacyaspecten en het gestructureerd opslaan van de verzamelde data. Modellen die geconstrueerd zijn met behulp van data zijn in staat om te redeneren over situaties die vergelijkbaar zijn met data die eerder is gezien, maar AI is op dit moment niet ver genoeg ontwikkeld om te redeneren over situaties die niet eerder in data zijn gezien. Dit betekent dat AI in combinatie met data een grote bijdrage kan leveren aan verkeersmanagement, maar AI kan niet worden gezien als techniek die altijd een oplossing biedt in situaties waarover weinig gegevens bekend zijn.

Om AI-toepassingen tot een succes te maken is het belangrijk om domeinkennis mee te nemen in de ontwikkeling van modellen en algoritmes. AI is in staat om zelfstandig inzichten af te leiden uit data, maar de verwachting van de geïnterviewde experts is dat het integreren van domeinkennis altijd noodzakelijk is, zelfs in de meest eenvoudige voorspellingen. Een andere belangrijke vraag is wat er in de toekomst gebeurt met traditionele verkeersmodellen. Op basis van de challenge concluderen we dat AI op de korte termijn een aanvulling is op deze traditionele modellen, maar het is niet waarschijnlijk dat deze modellen compleet worden vervangen. Het is wel mogelijk dat AI-modellen in staat zijn om nieuwe inzichten met betrekking tot verkeer af te leiden, wat vervolgens geïntegreerd kan worden in bestaande modellen. Op die manier kan AI mogelijk tot meer kennis over verkeer leiden. Daarnaast kan bestaande kennis over verkeer wellicht gebruikt worden om de uitlegbaarheid van AI modellen te verbeteren.

Nieuwe ontwikkelingen op het gebied van AI zorgen de laatste jaren voor modellen en algoritmes die steeds complexer worden, waardoor het voor domeinexperts steeds moeilijker wordt om AI-gebaseerde beslissingen te begrijpen. Het is van groot belang dat modellen uitlegbaar zijn, zodat de eindgebruiker bijvoorbeeld kan inschatten waarom een model tot een voorspelling is gekomen, of waarom een voertuig automatisch tot stilstand is gekomen. Het is belangrijk om te benadrukken dat deze uitlegbaarheid grenzen heeft, met name op het moment dat complexe modellen gebruikt worden om nauwkeurig te voorspellen of te beslissen. Als een toepassing vraagt om uitlegbaarheid met veel detail, dan is het wellicht nodig om modellen in te zetten die minder complex zijn maar tegelijkertijd beter uitlegbaar. Een keerzijde hiervan is dat kwaliteit van voorspellingen mogelijk kan afnemen omdat het een eenvoudiger model betreft. Er zal altijd een trade-off zijn tussen kwaliteit van voorspellingen en de mate van uitlegbaarheid. Naast uitlegbaarheid is er in toenemende mate aan-

dacht voor bias (vooringenomenheid) in data en modellen, wat in de praktijk tot onwenselijke beslissingen kan leiden. Het is bijvoorbeeld niet wenselijk als specifieke groepen weggebruikers nooit groen licht krijgen op een kruispunt.

Tijdens de challenge zijn er diverse toepassingen geïdentificeerd waar AI meerwaarde kan bieden voor verkeersmanagement. De discussies met experts hebben laten zien dat het naast de technische ontwikkeling van toepassingen ook zeer belangrijk is om te focussen op evaluatie van het systeem. Dit is niet alleen tijdens het ontwerp nodig, maar ook na de daadwerkelijke toepassing zodat het gewaarborgd is dat een systeem goed blijft functioneren. Daarnaast zijn er mogelijk implicaties voor regelgeving op het gebied van privacy. En toepassingen met in-carsystemen vragen mogelijk extra regelgeving voordat volledige toepassing in de praktijk mogelijk is. Tot op heden worden toepassingen vaak getest op pilotoniveau. Om AI een meer prominente rol te laten spelen in verkeersmanagement, is het noodzakelijk om hierin extra stappen te zetten, zodat toepassingen getest in een pilot ook leiden tot structurele toepassing op grotere schaal. Naast evaluatie zijn mogelijke veiligheidsrisico's ook een belangrijk aspect. Op het moment dat AI systemen zelfstandig beslissingen nemen met hoge risico's, dan ontstaat de vraag wie precies verantwoordelijk is voor de uitkomsten. Deze vraag moet altijd meegenomen worden in de ontwikkeling van systemen. Dit geldt niet alleen voor AI-systemen, maar ook voor softwaresystemen in het algemeen.

De challenge heeft ook laten zien dat het voor experts op het gebied van verkeersmanagement waardevol is om zich verder te verdiepen in de mogelijkheden die AI biedt. De verwachting is dat het hierbij cruciaal is om actief het gesprek aan te gaan met AI-experts zodat nieuwe ontwikkelingen kunnen landen in het domein en zodat nieuwe ontwikkelingen op het gebied van AI gedreven worden door vragen die in de praktijk spelen. Dit kan in het kader van bijvoorbeeld promotieplaatsen aan universiteiten op het snijvlak tussen AI en verkeersmanagement. Een ander waardevol initiatief is de NL AI Coalitie, waarin diverse organisaties samenwerken om AI ontwikkeling binnen Nederland te versnellen en om initiatieven op dit vlak met elkaar te verbinden.

Ook op Europees niveau wordt verder nagedacht over de manier waarop AI-toepassingen kunnen worden ingezet in diverse domeinen. De European High-Level Expert Group on AI heeft richtlijnen vastgesteld voor de inzet van betrouwbare AI. Daarin wordt bijvoorbeeld vastgelegd waar systemen aan moeten voldoen op het gebied van transparantie en uitlegbaarheid, maar ook privacy en data governance. De toepassingen in deze challenge en de bijbehorende uitdagingen onderstrepen het belang van deze aspecten en laten zien dat ontwikkeling van AI niet alleen gericht moet worden op de technische aspecten van bijvoorbeeld data en algoritmes.

Literatuur

Adadi, A., & Berrada, M. (2018). Peeking Inside the Black-Box: A Survey on Explainable Artificial Intelligence (XAI). *IEEE Access*, 6, 52138–52160. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2870052>

Alpaydin, E. (2020). *Introduction to Machine Learning*. MIT Press

Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A., & Bengio, Y. (2016). *Deep learning*. MIT press.

Gupta, I & Nagpal G. (2020). *Artificial Intelligence and Expert Systems*. Mercury Learning & Information

Hegy, A., Hoogendoorn, S. P., Schreuder, M., Stoelhorst, H., & Viti, F. (2008). SPECIALIST: A dynamic speed limit control algorithm based on shock wave theory. *2008 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 827–832.

<https://doi.org/10.1109/ITSC.2008.4732611>

den Hollander, R., Adhikari, A., Tolios, I., van Bekkum, M., Bal, A., Hendriks, S., ... & Raaijmakers, S. (2020, September). Adversarial patch camouflage against aerial detection. In *Artificial Intelligence and Machine Learning in Defense Applications II* (Vol. 11543, p. 115430F). International Society for Optics and Photonics.

Hoogendoorn, S., Taale, H., Wilminck, I., van Katwijk, R., Immers, B., Schuurman, H. (2011). *De toekomst van verkeersmanagement*.

Huisken, G., Pepikj, M., Yperman, I., Feitsma, A., Rodrigues, N., & Vlemmings, T. (2020). Optimising Network Traffic Flow with Cooperative Traffic Management in the Amsterdam Region. *Virtual ITS European Congress*.

INRIX. (z.d.). *INRIX AI Traffic*. INRIX. Geraadpleegd 26 mei 2021, van <https://inrix.com/products/ai-traffic/>

Kochenderfer, M. J. (2015). *Decision making under uncertainty: theory and application*. MIT press.

Lange, O., & Perez, L. (2020, september 3). *Traffic prediction with advanced Graph Neural Networks*. Deepmind. <https://deepmind.com/blog/article/traffic-prediction-with-advanced-graph-neural-networks>

Mahajan, N., Hegyi, A., Van De Weg, G. S., & Hoogendoorn, S. P. (2015). Integrated Variable Speed Limit and Ramp Metering Control Against Jam Waves – A COSCAL v2 Based Approach. *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, 1156–1162.

<https://doi.org/10.1109/ITSC.2015.191>

Politie. (2019, september 30). *Inzet slimme camera's tegen afleiding in het verkeer*. <https://www.politie.nl/nieuws/2019/september/30/00-inzet-slimme-cameras-tegen-afleiding-in-het-verkeer.html>

Raaijmakers, S. A. (2021). *Deep Learning for Natural Language Processing*. Manning Publications.

Rabiner, L., & Schafer, R. (2010). *Theory and applications of digital speech processing*. Prentice Hall Press.

Rijkswaterstaat. (z.d.). *Oude Maas: proefproject brugopeningsvoorspeller Botlekbrug en Spijkenisserbrug*. Geraadpleegd 9 september 2021, van <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/projecten-overzicht/oude-maas-proefproject-brugopeningsvoorspeller-botlekbrug-en-spijkenisserbrug>

Russell, S., & Norvig, P. (2020). *Artificial intelligence: a modern approach*. 4th edition. 2020.

Silver, D., Huang, A., Maddison, C. J., Guez, A., Sifre, L., Van Den Driessche, G., ... & Hassabis, D. (2016). Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. *Nature*, 529(7587), 484-489.

Smith, S., Barlow, G., Xie, X.-F., & Rubinstein, Z. (2013). Smart Urban Signal Networks: Initial Application of the SURTRAC Adaptive Traffic Signal Control System. *Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling*, 23. <https://ojs.aaai.org/index.php/ICAPS/article/view/13594>

Smooover. (2015). *Eindrapport*.

Sutton, R. S., & Barto, A. G. (2018). *Reinforcement learning: An introduction*. MIT press.

Szeliski, R. (2010). *Computer vision: algorithms and applications*. Springer Science & Business Media.

Technolution Move. (z.d.-a). *Technolution FlowCube: nauwkeurige data over fiets- en voetgangersverkeer*. Technolution Move NL. Geraadpleegd 26 mei 2021, van <https://www.technolution.com/move/nl/flowcube/>

Technolution Move. (z.d.-b). *MobiMaestro - Technolution Move*. Technolution Move NL. Geraadpleegd 26 mei 2021, van <https://www.technolution.com/move/nl/mobimaestro/>

Vivacity Labs. (2020, november 9). *TfGM chooses Vivacity Labs to deploy AI-controlled road junctions to optimise traffic networks*. Vivacity Labs. <https://vivacitylabs.com/greater-manchester-chooses-vivacity-labs-to-deploy-ai-controlled-road-junctions-to-optimise-traffic-networks/>

Vivacity Labs. (z.d.). *Home*. Vivacity Labs. Geraadpleegd 28 mei 2021, van <https://vivacitylabs.com/>

Bijlagen

A. Bekeken bronnen in quick-scan

Abduljabbar, R., Dia, H., Liyanage, S., & Bagloee, S. A. (2019). Applications of Artificial Intelligence in Transport: An Overview. <i>Sustainability</i> , 11(1), 189. https://doi.org/10.3390/su11010189
Hoogendoorn, S., Taale, H., Wilmink, I., Van Katwijk, R., Immers, B., & Schuurman, H. (2011). <i>De toekomst van verkeersmanagement</i> .
Howell, S. (2018). Meta-analysis of machine learning approaches to short-term urban traffic prediction. <i>Proc. Scottish Transp. Appl. Res. Conf.(STAR)</i> , (pp. 1-15).
Huisken, G., Pepikj, M., Yperman, I., Feitsma, A., Rodrigues, N., & Vlemmings, T. (2020). Optimising Network Traffic Flow with Cooperative Traffic Management in the Amsterdam Region. <i>Virtual ITS European Congress</i> .
INRIX. (z.d.). <i>INRIX AI Traffic</i> . Inrix. Geraadpleegd 26 mei 2021, van https://inrix.com/products/ai-traffic/
Krishnakumari, P., Cats, O., & van Lint, H. (2020). A compact and scalable representation of network traffic dynamics using shapes and its applications. <i>Transportation Research Part C: Emerging Technologies</i> , 121, 102850. https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102850
Lange, O., & Perez, L. (2020, september 3). <i>Traffic prediction with advanced Graph Neural Networks</i> . Deepmind. https://deepmind.com/blog/article/traffic-prediction-with-advanced-graph-neural-networks
MeBeSafe. (z.d.). <i>MeBeSafe - Measures for Behaving Safely in Traffic</i> . MeBeSafe. Geraadpleegd 26 mei 2021, van https://www.mebesafe.eu/
Mediator. (z.d.). <i>MEDIATOR - MEdiating between Driver and Intelligent Automated Transport systems on Our Roads</i> . Mediator. Geraadpleegd 26 mei 2021, van https://mediatorproject.eu/
Meijer, R., Dam, E. van, Bouma, H., Baan, J., & Hurk, S. E. van der. (2019). Measurement method for objective cyclist behavior parameters. <i>Traffic Injury Prevention</i> , 20(sup3), 16–20. https://doi.org/10.1080/15389588.2020.1745196
Niestadt, M., Debyser, A., Scordamaglia, D., & Pape, M. (2019). <i>Artificial intelligence in transport: Current and future developments, opportunities and challenges</i> . European Parliamentary Research Service.
Platform Beter Benutten. (z.d.). <i>Spookfiles</i> . Geraadpleegd 26 mei 2021, van https://beterbenutten.nl/spookfiles
Politie. (2019, september 30). <i>Inzet slimme camera's tegen afleiding in het verkeer</i> . https://www.politie.nl/nieuws/2019/september/30/00-inzet-slimme-cameras-tegen-afleiding-in-het-verkeer.html
Rapid Flow Technologies. (z.d.). <i>Surtrac: Adaptive Traffic Management System for Traffic Optimization</i> . Geraadpleegd 26 mei 2021, van https://www.rapidflowtech.com/surtrac/how-it-works

Smith, S., Barlow, G., Xie, X.-F., & Rubinstein, Z. (2013). Smart Urban Signal Networks: Initial Application of the SURTRAC Adaptive Traffic Signal Control System. <i>Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling</i> , 23. https://ojs.aaai.org/index.php/ICAPS/article/view/13594
Smooover. (2015). <i>Eindrapport</i> .
Technolution Move. (z.d.-a). <i>Technolution FlowCube: nauwkeurige data over fiets- en voetgangersverkeer</i> . Technolution Move NL. Geraadpleegd 26 mei 2021, van https://www.technolution.com/move/nl/flowcube/
Technolution Move. (z.d.-b). <i>MobiMaestro - Technolution Move</i> . Technolution Move NL. Geraadpleegd 26 mei 2021, van https://www.technolution.com/move/nl/mobimaestro/
van Ommeren, C., Willems, F., Paardekooper, J. W., Bakri, T., & Beekelaar, R. (2020). <i>Artificiële intelligentie in mobiliteit en transport: Position paper</i> . https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Abe6b2833-4410-4700-8151-f0d7d4f52e41
Vivacity Labs. (2020, november 9). TfGM chooses Vivacity Labs to deploy AI-controlled road junctions to optimise traffic networks. <i>Vivacity Labs</i> . https://vivacitylabs.com/greater-manchester-chooses-vivacity-labs-to-deploy-ai-controlled-road-junctions-to-optimise-traffic-networks/
Vlahogianni, E. I., Karlaftis, M. G., & Golias, J. C. (2014). Short-term traffic forecasting: Where we are and where we're going. <i>Transportation Research Part C: Emerging Technologies</i> , 43, 3–19. https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.01.005
Waze Mobile. (z.d.). <i>Driving Directions, Traffic Reports & Carpool Rideshares by Waze</i> . Geraadpleegd 26 mei 2021, van https://www.waze.com/
Zhang, J., Wang, F.-Y., Wang, K., Lin, W.-H., Xu, X., & Chen, C. (2011). Data-Driven Intelligent Transportation Systems: A Survey. <i>IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems</i> , 12(4), 1624–1639. https://doi.org/10.1109/TITS.2011.2158001
ZOOF. (z.d.). <i>ZOOF: Samen Slim Rijden!</i> Geraadpleegd 26 mei 2021, van http://www.zoof.nu/home.html

B. Deelnemers expert interviews

De interviews met experts zijn uitgevoerd in de periode van april tot juni 2021. Tijdens de interviews is gesproken met de volgende personen:

- Bram Bakker (Founder / director bij Cygnify BV)
- Panchamy Krishnakumari (Assistant professor bij TU Delft)
- Paul van Koningsbruggen (Director Mobility bij Technolution)
- Stephan Raaijmakers (Senior scientist bij TNO, hoogleraar bij Universiteit Leiden)
- Petra Delsing (Kwartiermaker AI bij IenW)
- Stijn van Balen (Product owner datalab bij Rijkswaterstaat)
- Fred van der Zeeuw (Senior Advisor bij Rijkswaterstaat)
- Mark Nicholson (CEO VivaCity)
- Wolfgang Mühlbauer (Sales director INRIX)
- Jose Carazo (Solutions architect INRIX)

C. Volledige lijst toekomstige toepassingen

Een lijst van 11 mogelijke toekomstige toepassingen is opgesteld, waaruit 6 toepassingen geselecteerd zijn voor de workshop, deze zijn **dikgedrukt**. De volledige lijst met toekomstige toepassingen is:

- **Zelflerende VRIs en regelsystemen: Het gebruiken van reinforcement learning voor verkeersregelinstallaties, zodat deze adaptief worden.**
- Voertuigen verdelen over rijstroken met adviezen: Door monitoring met camera's bepalen welke spreiding van voertuigen over rijstroken gewenst is voor de doorstroming, en deze adviseren.
- **Voorspellen of inhaalverbod effectief is: Door monitoring bepalen of het instellen van een inhaalverbod voor vracht een positieve invloed heeft op de doorstroming, en indien dit het geval is een verbod instellen.**
- Waarschuwen bij afwijkende verkeersstromen: Door middel van anomaly detection afwijkingen in verkeersdoorstroming detecteren, zoals verkeer dat dichter op elkaar rijdt dan gebruikelijk, en hiervoor waarschuwingen afgeven.
- **Monitoren van netwerktoestand met data afkomstig van diverse partijen: Met federated learning technieken zijn toepassingen te bedenken in verkeersmanagement waarbij data delen gevoelig ligt of niet mogelijk is, maar wel een model kan worden ontwikkeld met deze databronnen.**
- **Reistijden voorspellen en routes adviseren: Met graph neural networks kunnen betere routeadviezen ontwikkeld worden, die vervolgens aan de weggebruikers gecommuniceerd worden, waarbij het belangrijk is dat weggebruikers een uitleg over het advies krijgen.**
- Ecodriving met AI: Door middel van AI kunnen algemene en persoonlijke snelheidsadviezen gegeven worden die de algehele verkeersstroom egaliseren en snelheidsverschillen verminderen, om zo de doorstroming te verbeteren en emissies te verminderen.
- **Tegengaan van schokgolven: AI-technieken kunnen gebruikt worden om een aantal tekortkomingen van algoritmes zoals SPECIALIST EN COSCAL te verbeteren.**
- Herkenning van verkeersborden: Objectherkenning kan gebruikt worden om verkeersborden die een weggebruiker tegenkomt te detecteren, en de informatie te presenteren of een waarschuwing af te geven.
- Flexibele rijstrookindeling: Op basis van de schatting van de verwachte verkeersstroom in beide rijrichtingen kunnen de beschikbare stroken van de weg verdeeld over de twee rijrichtingen.
- **Voorspellen van de duur van een incident: Voortbouwend op de incidentkans schatting van Rijkswaterstaat, kan ook de duur van incidenten voorspeld worden.**

D. Selectiecriteria

De selectiecriteria zijn gebruikt om toe te lichten waarom de keus voor 6 toepassingen als meest veelbelovend gemaakt wordt. De criteria dienen hierbij als richtlijnen, de toepassingen worden niet gescoord worden op basis van de criteria. De selectiecriteria zijn:

- Binnen 1-5 jaar implementatie mogelijk
- Succeskans (businesscase, dataverzameling, technische haalbaarheid)
- Wenselijkheid (effecten en ordegrrootte, randvoorwaarden waaraan moet worden voldaan; privacy, wetgeving gebruik data, uitlegbaarheid)
- Spreiding over verkeersmanagement functies
- Spreiding over doel van de toepassing (duurzaamheid, veiligheid, doorstroming)

E. Workshop toekomstige toepassingen

Tijdens een workshop op donderdag 5 augustus 2021 zijn de toekomstige toepassingen besproken en verder uitgewerkt. Hierbij zijn alle deelnemers opgedeeld in twee groepen, en per groep zijn er drie toepassingen besproken. De workshop is afgesloten met een plenaire sessie waarin de toepassingen met de hele groep zijn besproken, en er is nagedacht over de uitkomsten en aanbevelingen voor de toekomst. De volgende deelnemers waren bij de workshop aanwezig:

- Panchamy Krishnakumari (Assistant professor bij TU Delft)
- Ajaya Adhikari (Scientist bij TNO)
- Marco Schreuder (Adviseur bij Rijkswaterstaat)
- Rudi Kraaijeveld (Verkeerskundige en adviseur bij Rijkswaterstaat)
- Henk Taale (Consultant bij Rijkswaterstaat, Assistant professor bij TU Delft)
- Max Schreuder (Projectleider bij TNO)
- Isabel Wilmink (Scientist bij TNO)
- Erwin Walraven (Scientist bij TNO)
- Dawn Spruijtenburg (Scientist bij TNO)