

**Loopstroomsimulaties om veilig en comfortabel te sturen in
drukke gebieden**

Henri Palm
DAT.Mobility
hpalm@dat.nl

Jeroen Steenbakkers
Incontrol
Jeroen.Steenbakkers@incontrolsim.com

**Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk
20 en 21 november 2014, Eindhoven**

Samenvatting

Loopstroomsimulaties om veilig en comfortabel te sturen in drukke gebieden

Voetgangers-/bezoekersstromen zijn een relevant thema bij gebiedsontwikkeling en mobiliteit. In toenemende mate vinden kwantitatieve analyses naar de capaciteit en veiligheid van loopverbindingen plaats. Microsimulatiemodellen spelen hierin een belangrijke rol. Deze modellen worden steeds vaker voor stadions, stations, en drukbezochte locaties in steden ingezet.

In de analyses spelen afwikkelniveaus een belangrijke rol. Een afwikkelniveau wordt niet alleen gekenmerkt door snelheid en doorstroming, maar ook door een bepaald comfortniveau dat een voetganger ervaart. Deze afwikkelniveaus zijn een belangrijke output om knelpunten met betrekking tot capaciteit en/of veiligheid te onderzoeken.

Het simulatiemodel Pedestrian Dynamics is state-of-the-art. De loop- en verblijfgebieden worden met Explicit Corridor Map technologie bepaald en aan voetgangers kunnen gedetailleerde kenmerken worden opgehangen. Tienduizenden voetgangers/bezoekers passen in het model.

Met Pedestrian Dynamics zijn inmiddels diverse toepassingen gedaan. In deze paper worden drie voorbeelden van stedelijke toepassingen gegeven: Deventer op Stelten, Koninginnedag in Eindhoven en de troonswisseling in Amsterdam. Hieruit blijkt ook hoe waardevol de modellen voor de opdrachtgever waren. Inzicht in het loopgedrag van grote mensenmassa's hielp hen bij het vormgeven van een betere en veiligere doorstroming.

Het model is nog steeds in ontwikkeling. Conformereren aan groepgedrag, interactie met andere modaliteiten en nog realistischere visualisaties zijn onderwerpen waaraan wordt gewerkt. Ook nieuwe meetmethoden op basis van hoogwaardige visuele telcamera's, bluetooth en wifi leveren meer inzicht in voetgangersaantallen en -gedrag, waarmee de kwaliteit van voorspellen met simulatiemodellen verbetert.

1. Inleiding

Dringende bezoekersstromen als gevolg van een krappe doorgang vindt niemand prettig. Grote drukte (situaties met hoge dichtheden) kan zelfs resulteren in levensgevaarlijke situaties. Denk bijvoorbeeld aan de Love Parade in Duisburg in 2010, waar de aanwezigheid van grote mensenstromen die tegengestelde richtingen op wilden in een smalle tunnel dramatische gevolgen had.

De capaciteit van loopverbindingen vraagt daarom goed onderbouwde analyses, met name als het gaat om loopverbindingen in situaties waar grote aantallen bezoekers zich verplaatsen. Een gedetailleerde, kwantitatieve analyse van de loopstromen blijft in de ontwerpfase meestal achterwege. Daarvoor ontbreekt vaak de expertise bij ontwerpbureaus. Simulatiemodellen aangevuld met kennis over loopgedrag bieden ontwerpers nieuwe mogelijkheden daarin te helpen. Ook evenementen kunnen profiteren van deze modellen. Inzicht in het loopgedrag van mensenmassa's helpt bij het vormgeven van een veilige programmering van het evenement. In commerciële ruimtes is de grondprijs gerelateerd aan het aantal passanten. Daarmee zijn deze modellen ook voor projectontwikkelaars interessant.

Loopstroommodellen bieden de mogelijkheid om what-if analyses met betrekking tot capaciteit en veiligheid te doen. Ook zijn simulaties van evacuaties mogelijk, waardoor inzicht wordt verkregen in ontruimingstijden en de aanwezigheid van voldoende uitgangen.

Door krachtige (3D-)visualisatie is het ook een tool om de resultaten van de analyses op herkenbare en begrijpelijke wijze te presenteren.

We zien inmiddels de volgende locaties waar loopstroommodellen worden toegepast:

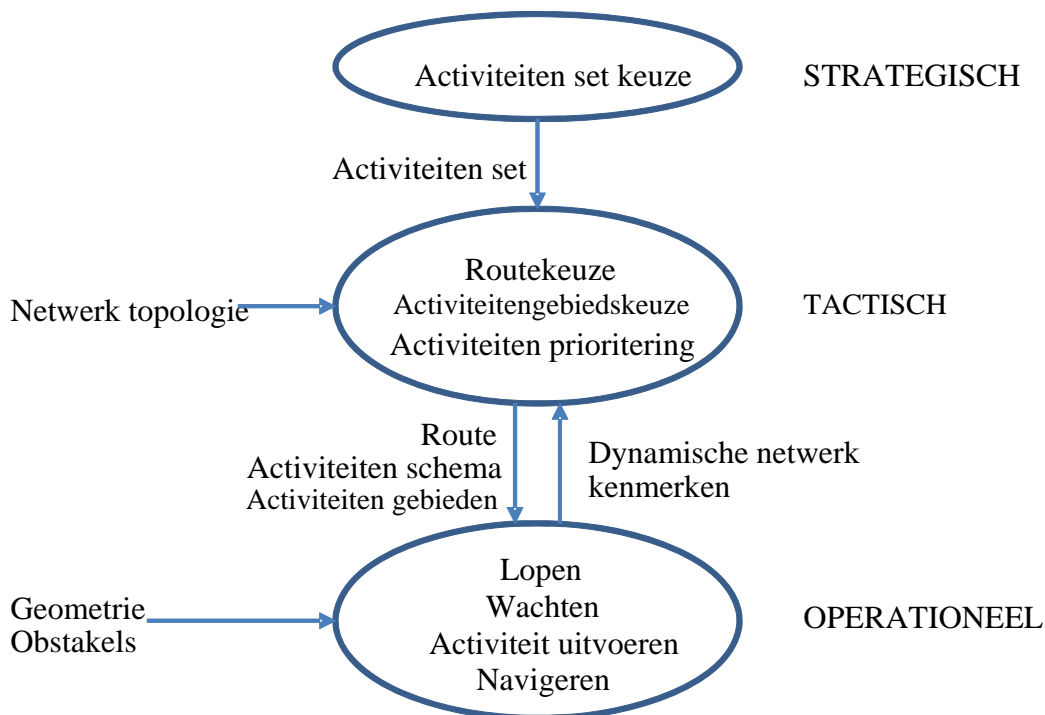
- stadions;
- stations;
- thema-/attractieparken;
- terminals op vliegvelden;
- evenementen;
- musea met groepswisselingen;
- stedelijke omgeving.

In dit paper gaan we in op enkele eigenschappen van het modelleren van loopstromen, om vervolgens in te gaan op het simulatiemodel Pedestrian Dynamics. Daarna volgen een aantal voorbeelden van toepassingen. Tot slot gaan we op enkele toekomstige ontwikkelingen in.

2. Het modelleren van loopstromen

2.1 Beslisniveaus en processen

Mensen voeren tijdens hun verplaatsing een aantal processen uit. Deze processen kunnen worden onderverdeeld in drie niveaus: het strategische niveau, het tactische niveau en het operationele niveau, zie ook figuur 2.1. Op het strategische niveau beslissen mensen welke activiteiten (en in welke volgorde) ze willen uitvoeren op weg naar hun bestemming. Het tactisch niveau heeft betrekking op de kortere termijn beslissingen van de mensen terwijl ze onderweg zijn, gegeven de beslissingen op het strategisch niveau. Het gaat hierbij vooral om routekeuze en de locaties waar de activiteiten worden uitgevoerd. Op het operationele niveau nemen mensen snelle beslissingen voor de direct volgende tijdsperiode, die in lijn liggen met de beslissingen op het tactische niveau. De meeste beslissingen op dit operationele niveau hebben betrekking op het loopgedrag van mensen. Dit gedrag is afhankelijk van persoonlijke kenmerken, zoals de snelheid en de afmetingen van de voetganger. Deze kenmerken worden op hun beurt bepaald door het geslacht van de voetganger, de leeftijd, het reisdoel enz.

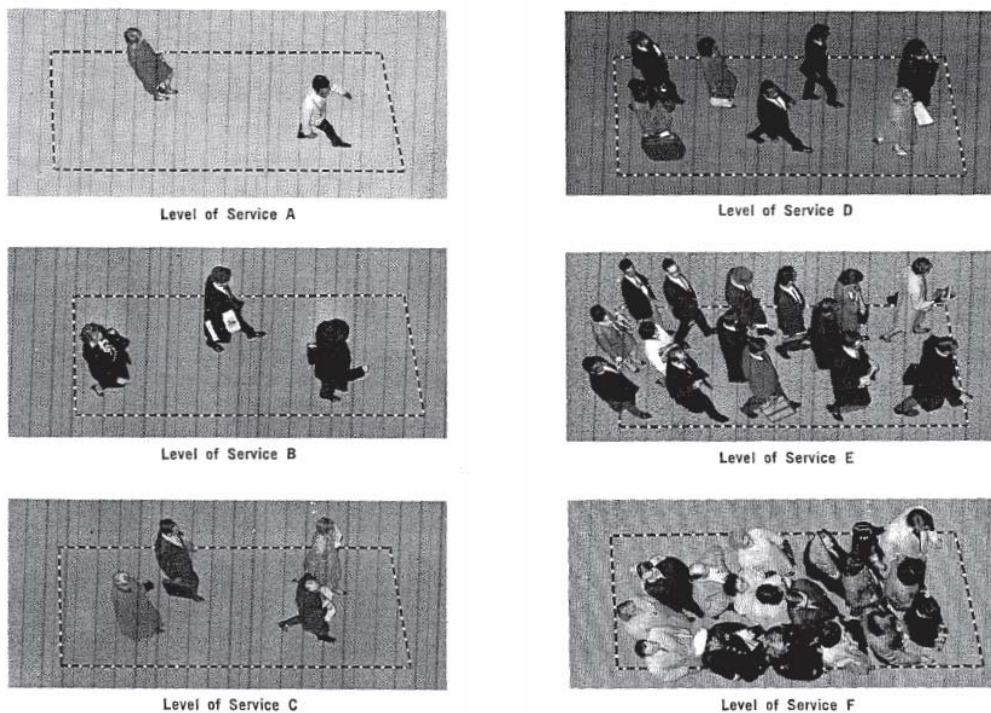


Figuur 2.1: Beslisniveaus en processen van voetgangers, Hoogendoorn et al. [1]

Net als bij het modelleren van het autoverkeer kan ook bij loopstromen onderscheid worden gemaakt in macroscopische en microscopische modellen. Macroscopische modellen zien voetgangers samen als een stroom en het verkeer wordt gerepresenteerd door variabelen als dichtheid, intensiteit en snelheid. Microscopische modellen beschrijven het plaats-tijdgedrag van individuele voetgangers, welke invloed ondervinden van andere voetgangers in hun buurt.

2.2 Afwikkelniveaus

Net als bij het autoverkeer verandert de snelheid van voetgangers als gevolg van drukte. Fruin [2] onderscheidt verschillende afwikkelniveaus als gevolg van drukte. Een afwikkelniveau wordt niet alleen gekenmerkt door snelheid en doorstroming, maar ook door een bepaald comfortniveau. In figuur 2.2 staat een impressie van de drukte per afwikkelniveau in een gang. Bij het laagste afwikkelniveau, niveau F, ontstaat er een wachtrij van mensen naar het drukke punt toe.



Figuur 2.2: Afwikkelniveaus van voetgangersstromen in een gang

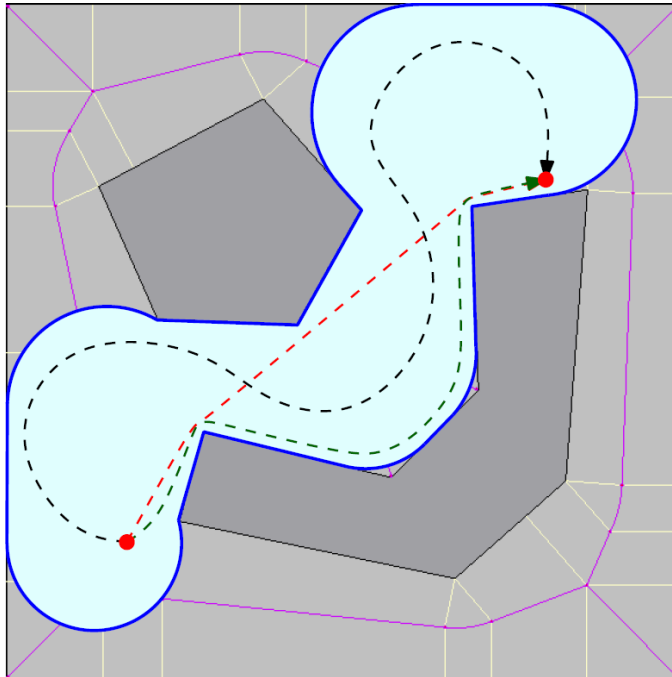
Met deze afwikkelniveaus is het ook mogelijk om knelpunten te onderzoeken. Hoe vaak en hoe lang doen zich de afwikkelniveaus voor, en hoeveel voetgangers hebben welke afwikkelniveaus. Een eenduidige knelpuntnormering ontbreekt, omdat de situaties sterk verschillend zijn. Zo is op een treinstation vaak sprake van een kortdurend, pieksgewijs aanbod, terwijl bij voetbalstations na afloop van de wedstrijd iedereen het stadion wil verlaten. Het blijft dus maatwerk, maar het mag duidelijk zijn dat hoe vaker en langer afwikkelniveau F zich voordoet, hoe meer de veiligheid in het geding komt.

2.3 Het model Pedestrian Dynamics

Het simulatiemodel dat hier wordt uitgelicht is Pedestrian Dynamics. Dit model simuleert voetgangers op microscopisch niveau. Enkele belangrijke eigenschappen van dit model zijn:

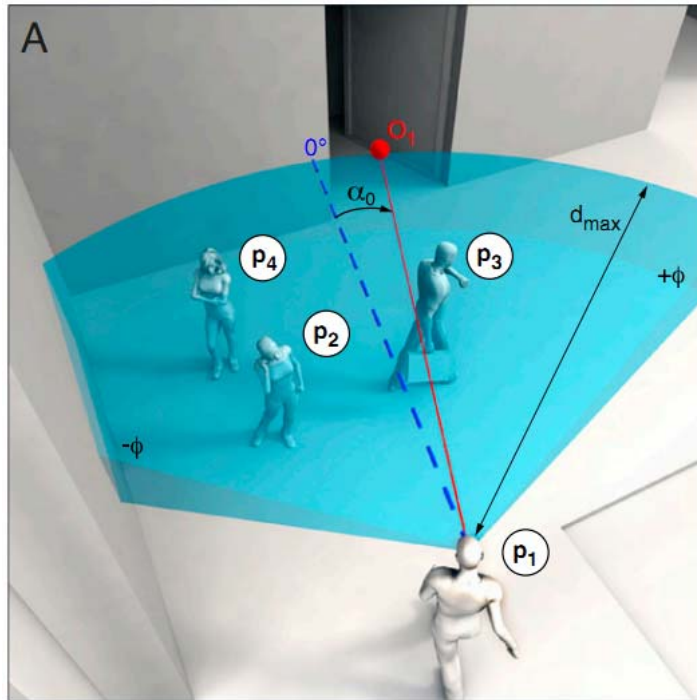
- Het model maakt gebruik van de zogenaamde Explicit Corridor Map (ECM) technologie [3] (zie figuur 2.3), die op basis van objecten het beloopbaar gebied bepaalt. Vervolgens wordt een netwerk gecreëerd dat wordt gebruikt om de beschikbare routes voor de voetganger te berekenen. Dit kan ook worden toegepast

op infrastructuur met meerdere hoogtelagen (de zogenaamde 'multi-layered' ECM technologie [4]).



Figuur 2.3: *Explicit Corridor Mapping*

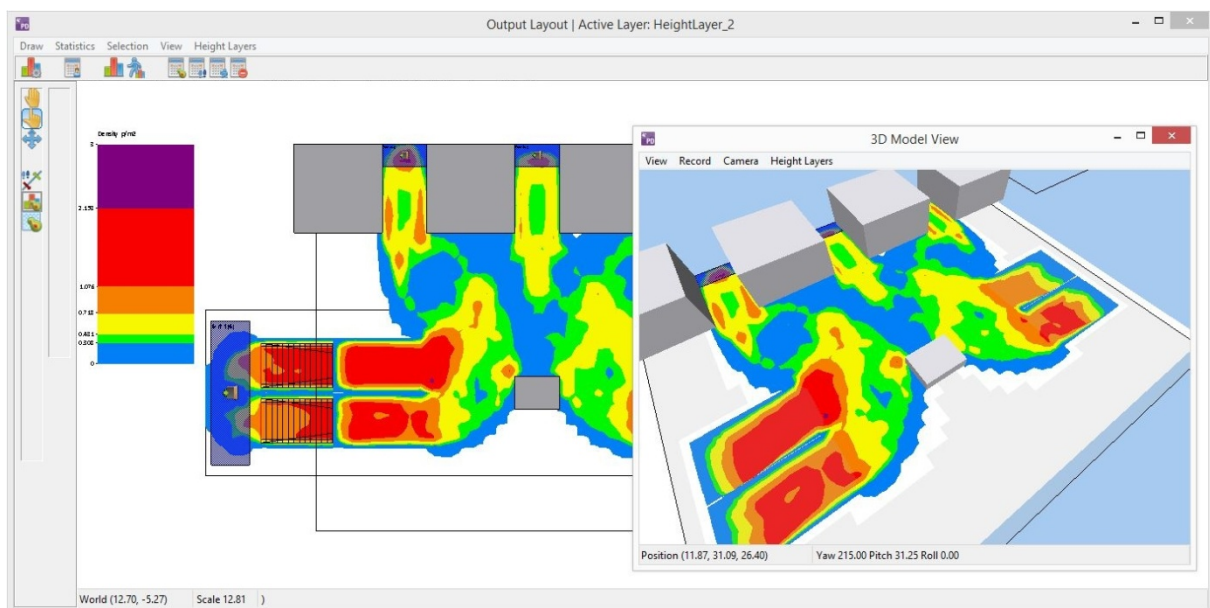
- b. Dynamische routing op basis van Indicative Route Method [5]. De voetgangers bepalen dynamisch de beste route op basis van:
 - afstand van de route;
 - drukte op de route;
 - andere objecten op een route.
- c. Loopsnelheid op basis van drukte. Het model bepaalt de loopsnelheid door de drukte rondom een voetganger. Dit wordt 'Density Based Crowd Simulation' [6] genoemd. De drukte, gemeten in personen/m², wordt ook gebruikt om de routekeuze van een voetganger te bepalen.
- d. De voetgangers hebben onderlinge interactie op basis van zogenaamde 'Local Collision Avoidance' [7] (zie figuur 2.4). Op basis van de zichtlijnen van de voetganger zal deze uitwijken wanneer deze gaat botsen met andere voetgangers.
- e. Gedetailleerde eigenschappen van voetganger. Er kunnen verschillende voetgangersprofielen gedefinieerd worden. Enkele belangrijke instellingen zijn:
 - Afmetingen, lengte en omvang.
 - Gewenste loopsnelheid. De werkelijke loopsnelheid zal afhankelijk zijn van de drukte.
 - Kijkafstand. Hoe ver kijkt een voetganger vooruit om zijn routekeuze eventueel aan te passen.
 - Mate waarin een nieuwe route zal worden overwogen. Dus is de voetganger bijvoorbeeld gevoelig voor drukte.
 - Kijkhoek. Hoe breed kijkt een voetganger om te reageren op andere voetgangers of objecten.
 - Voorkeur voor links of rechts. Aan welke kant van het pad zal de voetganger uitwijken.



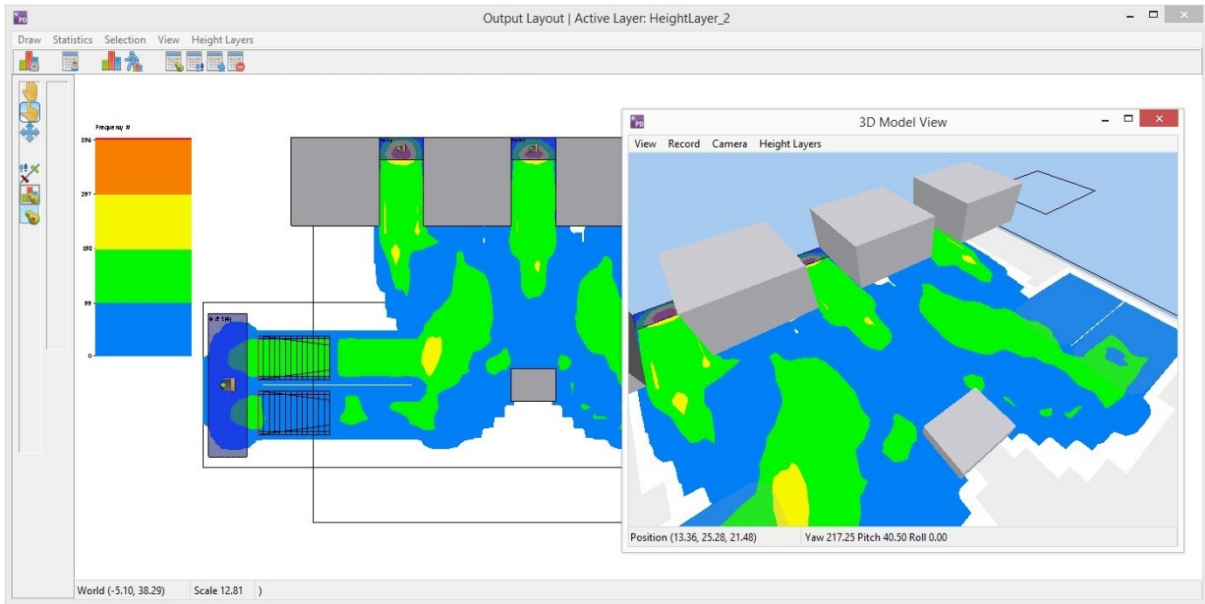
Figuur 2.4: Vision based micro simulation

- f. Grote infrastructuur met grote aantallen. Het model biedt de mogelijkheid om gebieden tot 2 km² met tienduizenden voetgangers in beschouwing te nemen.
- g. Gedetailleerde resultaten. De volgende meetwaarden kunnen worden geanalyseerd:
 - druktes, aantal voetganger per vierkante meter;
 - frequenties, aantallen voetgangers;
 - reistijden, tijd benodigd om van punt A naar punt B te komen. Dit geldt ook voor de bepaling van bijvoorbeeld evacuatie;
 - stromen: aantallen voetgangers en richting.

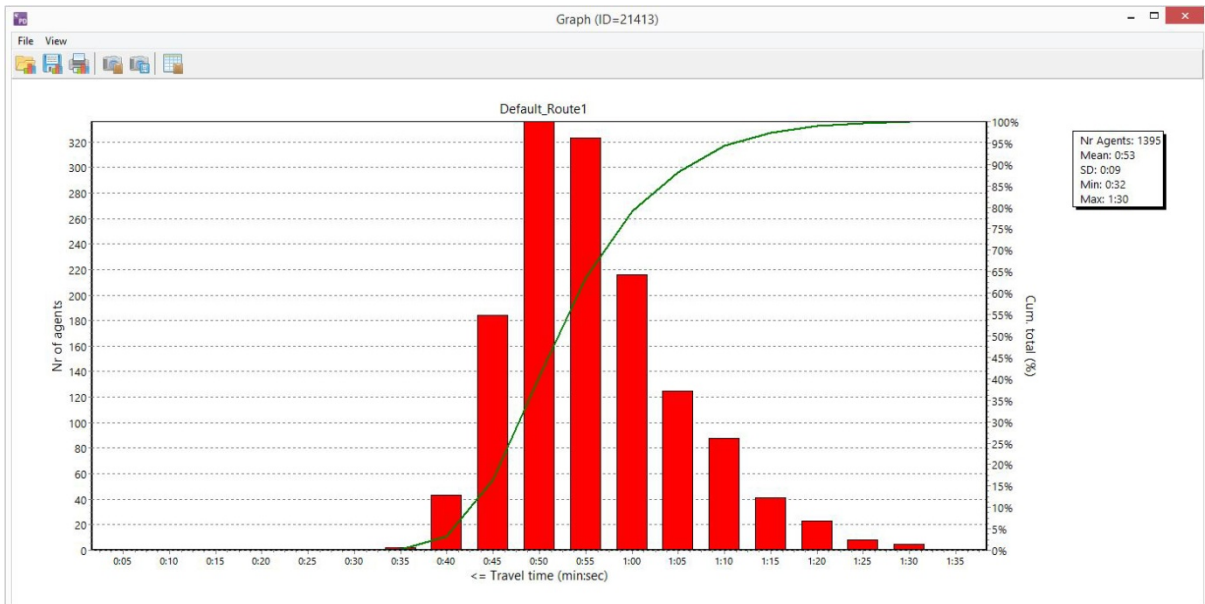
In de figuren 2.5 tot en met 2.7 zijn enkele voorbeelden hiervan opgenomen.



Figuur 2.5: Druktes, uitgedrukt in aantal voetganger per vierkante meter



Figuur 2.6: Frequenties, uitdrukt in aantallen voetgangers



Figuur 2.7: Reistijden, tijd benodigd om van punt A naar punt B te komen

3. Toepassingen

3.1 Projectaanpak

Een simulatiestudie van voetgangers bestaat uit de volgende onderdelen:

1. Voor de definitie en validatie van een scenario is het belangrijk om de juiste data beschikbaar te hebben ten aanzien van:
 - o Bezoekersaantallen en tijdsintervallen. Het verkrijgen van bezoekersaantallen kan op verschillende manieren:
 - fysiek tellen van stromen met behulp van bijvoorbeeld verkeersregelaars of stewards;
 - benaderen met behulp van historische gegevens;
 - benaderen met behulp van gegevens over de capaciteit van de infrastructuur en de processen die daarin plaatsvinden (bijv. de capaciteit van een trein).
 - o Beschikbare routes en keuzegedrag. Het is belangrijk om te weten welke routes de voetgangers kunnen nemen en welke keuzes daarin gemaakt worden.
 - o Processen. Wanneer er binnen een infrastructuur verschillende processen worden uitgevoerd door de voetganger (bijv. de aanschaf van een treinkaartje), is het van belang om de capaciteit en procestijd van deze processen te weten. Deze parameters kunnen ook worden bepaald aan de hand van een stochastische analyse.
2. De modelbouw bestaat uit de volgende stappen:
 - o Invoer van een ontwerp van de infrastructuur. Dit kan bijvoorbeeld een CAD-tekening zijn.
 - o Definitie van alle relevante objecten binnen de infrastructuur. Denk hierbij aan muren, deuren, trappen, roltrappen etc.
 - o Definitie van processen, en de locatie daarvan, binnen de infrastructuur. Bepaalde gebieden binnen de infrastructuur krijgen daarmee een specifieke functie (bijv. wachtgebied).
 - o Definitie van de locatie waar de voetgangers gegenereerd worden en het model weer verlaten.
 - o Definitie van de voetgangers:
 - Profielen. Op basis van de instellingen genoemd bij paragraaf 2.3 worden er verschillende profielen samengesteld.
 - Activiteiten. Welke activiteiten op welke locatie uitgevoerd gaan worden.
 - Activiteitenroute. Welke activiteiten uitgevoerd worden door welk bezoekersprofiel en in welke volgorde.
 - Generatie. Hoeveel voetgangers er per type en activiteitenroute worden gegenereerd en op welk moment.
3. Wanneer het eerste scenario wordt gesimuleerd is het van belang het model te valideren en dus te analyseren of dat het gedrag realistisch is en een goede weergave geeft van de (mogelijke) werkelijkheid. Er zijn verschillende methodes:
 - o Expertvalidatie. Een expert, vaak iemand die de infrastructuur goed kent, kijkt mee naar de simulatiebeelden en geeft zijn mening.

- Videobeelden. Videobeelden van de werkelijke situatie worden vergeleken met de simulatiebeelden.
 - Data validatie. Historische gegevens en andere beschikbare data worden vergeleken met de resultaten uit de simulatie.
 - Statische analyse. De resultaten van de dynamische analyse worden vergeleken met de resultaten van de statische analyse. Een voorbeeld hiervan is de statische berekening van de evacuatie tijd ten opzichte van de dynamische bepaling.
4. Een scenario is een combinatie van een infrastructureel model met een set aan instellingen van de voetganger en bijbehorende activiteitenroutes. Dus aantallen, routes, profielen. Bij de experimentatie wordt het simulatiemodel voor een bepaald tijdsinterval (bijv. een dag of 2 uur) afgespeeld. Hierna worden de resultaten van dit experiment geanalyseerd.
 5. Op basis van de gegevens genoemd in paragraaf 2.3 (punt g) kan een scenario worden geanalyseerd. De
 6. Optimalisatie vindt plaats door terug te gaan naar stap 4 en waar nodig aanpassingen te doen aan het model:
 - Aanpassingen aan de infrastructuur. Om de situatie te verbeteren wordt het fysieke ontwerp aangepast.
 - Aanpassingen aan de voetgangers. Door de profielen en aantallen te veranderen kan er middels een gevoeligheidsanalyse worden bepaald welke situatie het meest gewenst is.
 - Aanpassingen aan processen. Zonder de infrastructuur of de voetgangersaantallen te veranderen kunnen er verschillende scenario worden gedefinieerd ten aanzien van de routing, activiteiten en bijbehorende proceseigenschappen.

De volgende paragrafen gaan in op enkele praktische toepassingen

3.2 Straattheaterfestival Deventer op Stelten

Tijdens het jaarlijkse straattheaterfestival 'Deventer op Stelten' komen veel bezoekers massaal naar de Deventer pleinen, waar allerlei theateracts worden opgevoerd. Inzicht in het loopgedrag van deze mensenmassa's helpt bij het vormgeven van een veilige programmering van dit evenement. Het evenementenbureau van de VVV Deventer en Goudappel Coffeng bogen zich over het 'crowd control' van het evenement. Het gaat met name om de grote mensenmassa's rond de hoofdacts op het grote plein De Brink.

Om vooraf te kunnen bepalen wat er kan gebeuren op De Brink en de aanpalende, smalle straatjes, is een simulatiemodel ontwikkeld met betrekking tot het loop- en verblijfgedrag van de bezoekers. Eerst is de toestroom voor aanvang van de act gesimuleerd; vervolgens de uitstroom na afloop van de act.

Drie typen groepen zijn onderscheiden:

- bezoekers die naar een andere voorstelling op een andere locatie gaan;
- bezoekers die naar huis gaan;
- bezoekers die op De Brink blijven (voor een drankje of de volgende act).

Figuur 3.1 is een screenshot van een gevuld plein tijdens de act.



Figuur 3.1: Screenshot bezoekers op De Brink

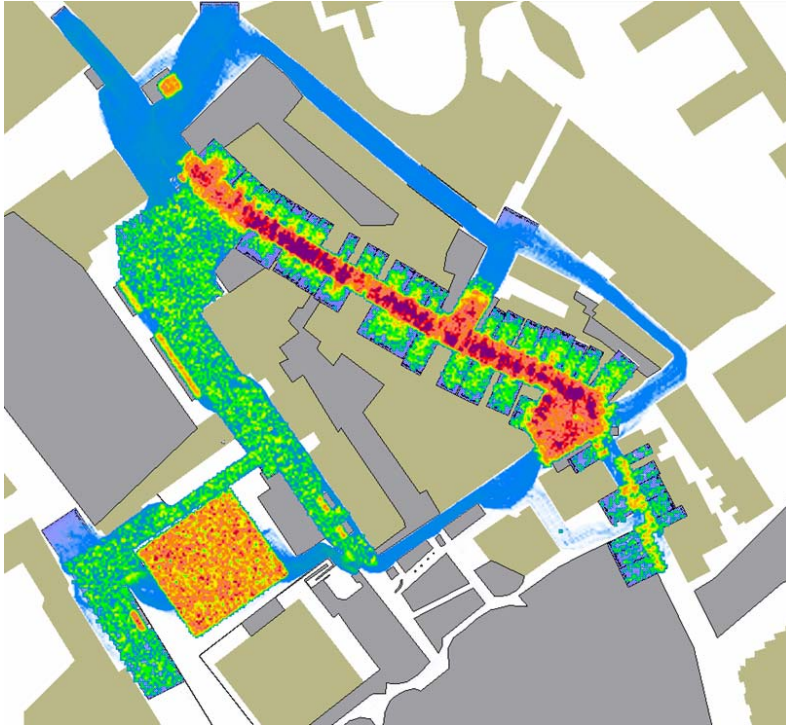
Het simulatiemodel is vervolgens gebruikt bij het toetsen van de programmering en het nemen van aanvullende verkeersmaatregelen voor de voetgangers tijdens het festival. Een belangrijke vraag betrof de zorg van de brandweer hoe snel het plein leegstroomt bij een ontruiming. Met het simulatiemodel kon de VVV Deventer hierop een antwoord geven.

3.3 Koninginnedag Eindhoven 2013

Afgelopen jaren bleek het centrum van Eindhoven -en dan vooral het stuk rond het Stratumseind- door de enorme toestroom van bezoekers aardig vast te lopen tijdens Koninginnedag. De gemeente Eindhoven was op zoek naar oplossingen om de bezoekersstromen meer inzichtelijk te krijgen en het effect van verschillende scenario's en maatregelen te analyseren. In nauwe samenwerking tussen de Gemeente Eindhoven en INCONTROL is er een model ontwikkeld van het gebied rondom het Stratumseind. Met dit model zijn de volgende zaken onderzocht:

- bottlenecks: waar ontstaan, voor hoe lang, welke bottlenecks;
- drukte: aantal bezoekers/m² over de tijd;
- maatregelen en effecten: effecten van aanpassing, ontsluiting of afsluiting van diverse routes van en naar het Stratumseind.

In de tot dan toe geldende situatie (zie figuur 3.2) was de drukte erg onevenredig verdeeld. Vooral aan de kant van het Catharinaplein was het druk. Met veel mensen die vanaf daar, door het Stratumseind, naar 't College gingen.



Figuur 3.2: Dichtheden Koninginnedag Eindhoven

Op basis van de resultaten van het initiële scenario zijn er vier alternatieven voorgesteld. Uit de resultaten bleek dat met een iets andere indeling van de looproutes op kritieke punten, de drukte kon worden verminderd en dat deze drukte meer kon worden verspreid over het gehele gebied.

Op basis van deze resultaten zijn aanbevelingen gegeven met te nemen maatregelen. Dankzij de kwantitatieve resultaten, deze aanbevelingen en diverse films, opgenomen van het simulatiemodel, hebben alle betrokken partijen beter inzicht gekregen in de bezoekersstromen op en rond het Stratumseind. De aanpassingen en maatregelen zijn vervolgens met succes in de praktijk gebracht tijdens Koninginnedag 2013. De gemeente Eindhoven had met Koninginnedag 2013 meer bezoekers dan het jaar ervoor. Maar over het algemeen werd het Stratumseind als minder druk ervaren dan 2012. Ondanks de drukte konden bezoekers hun weg goed vinden.

3.4 Troonswisseling in Amsterdam

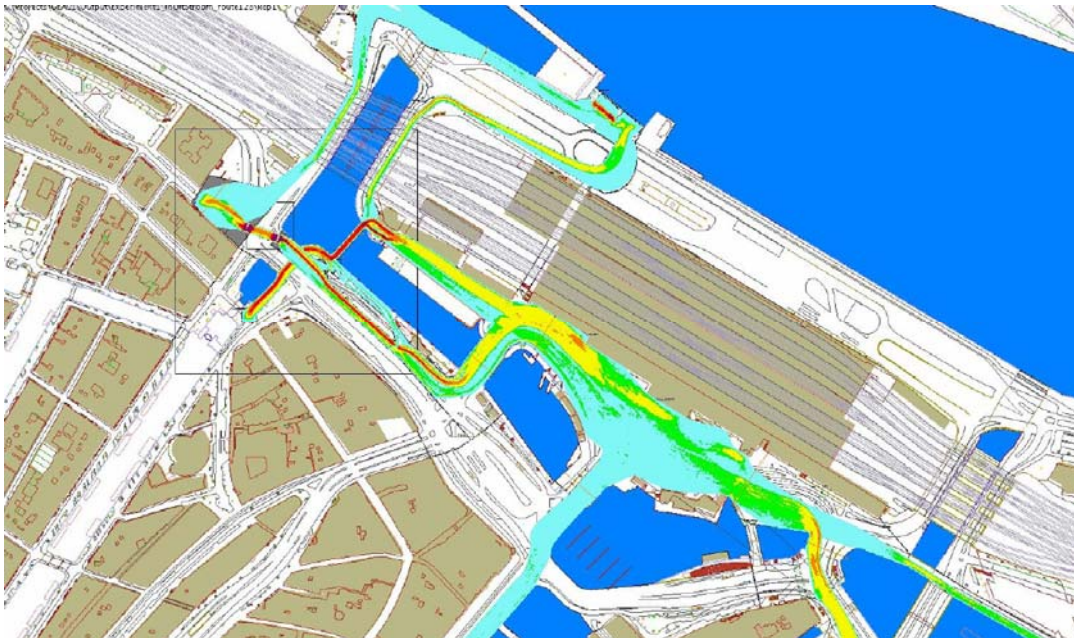
In het jaar 2013 deed koningin Beatrix afstand van de troon en werd Prins Willem-Alexander koning. In verband met deze officiële inhuldiging werden in Amsterdam verschillende evenementen georganiseerd, zoals de kroningsceremonie, de balkonscène en de Koninklijke rondvaart. De stad Amsterdam verwachtte veel meer bezoekers dan tijdens een reguliere Koninginnedag. Daarnaast kwamen er veel hoogwaardigheidsbekleders uit verschillende landen. Er werden dus veel extra veiligheidsmaatregelen genomen.

Om een efficiënte, veilige en comfortabele omgeving voor de honderdduizenden bezoekers in de drukke wijken van Amsterdam te creëren, is een simulatiemodel

ontwikkeld met Pedestrian Dynamics. In dit model zijn alle evenementen en festiviteiten die werden georganiseerd tijdens deze dag in Amsterdam gemodelleerd. Inclusief het tijdschema, bezoekersaantallen en punten van herkomst. Het model is opgebouwd uit alle beschikbare wegen en paden in het centrum van de stad. Daarnaast zijn alle vluchtwegen en de belangrijke knooppunten gedefinieerd. Op deze knooppunten werd met behulp van borden en verkeersregelaars sturing gegeven aan de stromen van voetgangers. De van het model lag bij de omgeving rondom het centraal station omdat de overgrote meerderheid van de bezoekers met de trein aankomt en vertrekt.

De gemeente Amsterdam heeft het simulatiemodel toegepast om verschillende scenario's te evalueren en zo onderbouwde beslissingen te nemen en dus de risico's en onzekerheden te verminderen. Belangrijke meetwaarden van de simulatiestudies waren de stroomintensiteiten en dichtheden in alle gebieden gedurende de dag (zie figuur 3.3). Op basis van de meetwaarden zijn er verschillende wijzigingen in de tijdelijke infrastructuur en beheersingsmaatregelen doorgevoerd. Enkele concrete voorbeelden hiervan:

- De bouw van een tijdelijke brug over een weg die gepland was voor de hoogwaardigheidsbekleders en de hulpdiensten. Dit was de beste oplossing om de stroom naar andere wijken van de stad Amsterdam te verbeteren.
- Bepaling van de locatie waar de mensen omgeleid dienden te worden wanneer de Dam vol was als gevolg van de balkonscène. Ook werd het meest geschikte tijdstip voor deze afsluiting bepaald.
- Bepaling van de beste verdeling van de menigte over de verschillende paden die naar het IJ leidde, waar 's avonds de koningsvaart was.



Figuur 3.3: Drukmetingen rondom centraal station

Met behulp van diverse maatregelen en het gebruik van loopstroomsimulatie is de troonwisseling een veilig en succesvol evenement geworden.

4. Ten slotte

4.1 Toekomstige modelontwikkelingen

Er zijn verschillende thema's en onderzoeken gaande die ook voor de loopstroomsimulatie toegevoegde waarde kunnen hebben in de toekomst:

- Groepsgedrag. In de huidige loopstroomsimulaties worden de voetgangers benaderd als individu. Echter in de werkelijke situatie bewegen mensen zich ook voort als groep. Hoe dit groepsgedrag plaatsvindt en kan worden gesimuleerd zijn interessante vraagstukken.
- Integratie met verkeer. Een belangrijk onderdeel van gebiedsontwikkeling en mobiliteit zijn de verkeersstromen. Er zijn verschillende pakketten die verkeer kunnen simuleren. Echter is er geen die een integrale aanpak biedt waarin de onderlinge interactie tussen verkeer en voetgangers geanalyseerd kan worden.
- Building Information Modelling (BIM). Er is momenteel een trend gaande waarin gebouwen en gebieden worden ontworpen met behulp van een 3-dimensionale tekening. Voorheen was dit voornamelijk 2-dimensionaal waarin elke hoogte-laag van de infrastructuur een eigen tekening had. Deze 3D-tekeningen bevatten veel informatie over de infrastructuur (bijv. materialen, kleur etc.). Deze modellen zijn zeer geschikt en ook direct gebruikt te worden als model voor de loopstroomsimulatie. Echter zullen er nog technische ontwikkelingen (bijv. een interface) in de software moeten plaatsvinden om deze innovatie te ondersteunen.

4.2 Nieuwe meettechnieken

Het registreren van voetgangers- of bezoekersaantallen is essentieel voor het ontwerpen of bepalen van het veiligheidsbeleid. Zeker in bijzonder drukke situaties is het ondoenlijk om de mensen op het oog te tellen. Visuele telcamera's kunnen deze taak overnemen. Speciale software herkent gezichten en beweging. Op die wijze kan worden bijgehouden met welke snelheid een stroom beweegt en of de stroom in- of uitgaand is.

Moderne mobiele telefoons zenden vaak continu bluetooth en wifi-signalen uit. Met eenvoudige ontvangers kunnen deze signalen worden gedetecteerd en geregistreerd. Omdat elke telefoon daarbij ook een uniek device-id afgeeft, is het met inzet van meerdere ontvangers op verschillende locaties mogelijk om een mobiele telefoon op meerdere locaties door de tijd waar te nemen. Het is daarmee mogelijk looproutes vast te leggen en reistijden tussen verschillende locaties te bepalen. Als het bluetooth device in de buurt van de meetsensor blijft is tevens de verblijfstijd te meten. Hoewel telcamera's al zeer nauwkeurig aantallen en richtingen meten, is het voordeel van deze aanvullende meetmethode dat ook gemeten kan worden welk deel van de bezoekers een bepaald soort gedrag vertoont, bijvoorbeeld of zij op één locatie blijven of dat zij zich juist veel in een evenementengebied verplaatsen.

De resultaten van metingen zijn vervolgens heel bruikbaar voor het valideren van de loopstroommodellen. Daarmee wordt het voorspellend vermogen van deze modellen groter en kunnen betere analyses van maatregelen of what-if scenario's worden uitgevoerd.

Literatuur

[1] Hoogendoorn, S.P., P.H.L. Bovy en W. Daamen (2001), Microscopic pedestrian wayfinding and dynamics modelling, In: M. Schreckenberg & S. Sharma, (eds.), Pedestrian and Evacuation Dynamics, Springer, Berlin, 123–154.

[2] Fruin, J.J. (1971), Design for pedestrians: A level-of-service concept, Highway Research Record 355, 1-15.

[3] R. Geraerts. 'Planning Short Paths with Clearance using Explicit Corridors'. In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'10), pp. 1997-2004, 2010.

[4] W.G. van Toll, A.F. Cook IV, and R. Geraerts. 'Navigation Meshes for Realistic Multi-Layered Environments'. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'11), pp. 3526-3532, 2011.

[5] I. Karamouzas, R. Geraerts, and M. Overmars. 'Indicative Routes for Path Planning and Crowd Simulation'. In The Fourth International Conference on the Foundations of Digital Games (FDG'09), pp. 113-120, 2009.

[6] W.G. van Toll, A.F. Cook IV, and R. Geraerts. 'Real-Time Density-Based Crowd Simulation'. Computer Animation and Virtual Worlds (CAVW), 23(1):59-69, 2012.

[7] M. Moussaïd, D. Helbing, G. Theraulaz. 'How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters'. Proceedings of the National Academy of Science (PNAS), 2011.