

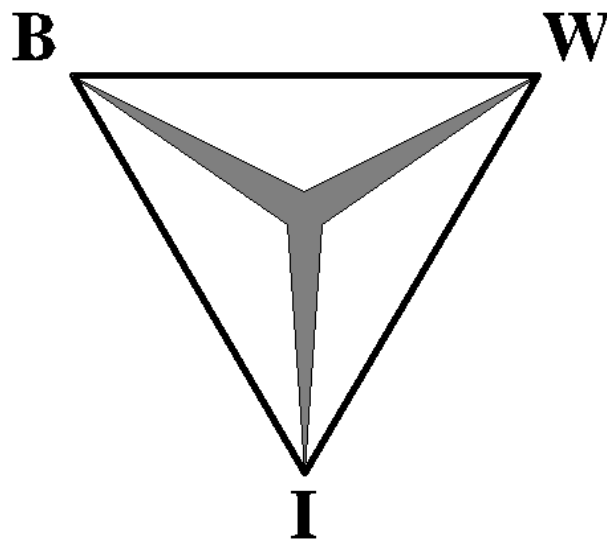
Het modelleren en simuleren van voetgangersstromen



Stageverslag
Nancy Marengo

Het modelleren en simuleren van voetgangersstromen

Stageverslag
Nancy Marengo



Onderwijsinstelling:



Vrije Universiteit
Faculteit der Exacte Wetenschappen
Studierichting Bedrijfswiskunde en Informatica
De Boelelaan 1081a
1081 HV Amsterdam



Stagebedrijf:
Incontrol Enterprise Dynamics
Planetenbaan 21
3606 AK Maarssen

► VOORWOORD

Van maart 2004 tot en met augustus 2004 heb ik voor mijn studie Bedrijfswiskunde en Informatica (BWI) aan de Vrije Universiteit te Amsterdam stage gelopen bij Incontrol Enterprise Dynamics (afgekort: Incontrol) te Maarssen. Voor u heeft u het bijbehorende eindverslag.

Voor het tot een goed einde brengen van de stage wil ik een aantal personen bedanken. Allereerst wil ik alle collega's van Incontrol bedanken. Ze stonden altijd open voor vragen en toonden interesse in mijn onderzoek. In het bijzonder wil ik Guus de Rooter (begeleiding Incontrol) bedanken voor zijn uitstekende begeleiding. Hij stond altijd klaar voor me en ik kon altijd bij hem terecht met vragen. Tenslotte wil ik niet te vergeten ook Ger Koole bedanken voor zijn begeleidende rol vanuit de Vrije Universiteit. Verder wil ik ook een woord van dank uitspreken aan familie en vrienden die mij tijdens de studie en ook stage hebben bijgestaan.

Ik wens u veel plezier toe bij het lezen van mijn eindverslag.

September 2004,
Nancy Marengo.

► MANAGEMENTUITTREKSEL

Heel het onderzoek naar voetgangersstromen is gebaseerd op observaties en empirische studies. De studies naar voetgangersstromen hebben betrekking op het observeren en vastleggen van voetgangersbewegingen (dataverzameling) en het beter begrijpen van de geobserveerde situaties om vervolgens bestaande theorieën uit te breiden en nieuwe theorieën te ontwikkelen (voetgangersanalyse). Op basis van de theorieën worden modellen ontwikkeld. Vooral simulatiemodellen, die moeten voorspellen hoe voetgangers zich gedragen, worden gebruikt. Ten aanzien van de modelleringstechniek kunnen voetgangersmodellen in drie categorieën worden verdeeld:

- macroscopische voetgangersmodellen: ze beschrijven de stroom als ware het een vloeistof die door een ruimte stroomt. Er worden geen “losse” voetgangers onderscheiden. Alle voetgangers zijn hetzelfde en vertonen hetzelfde gedrag.
- microscopische voetgangersmodellen: ze beschouwen iedere voetganger afzonderlijk en iedere voetganger heeft zijn eigen karakteristieken zoals loopsnelheid, looprichting, enz.,
- mesoscopische voetgangersmodellen: net als bij microscopische modellen worden individuele voetgangers in beschouwing genomen, maar hun gedrag wordt net als bij macroscopische modellen beschreven als functie van (gemiddelde) dichtheden en snelheden.

Probleemstelling

Incontrol Enterprise Dynamics heeft reeds tal van projecten uitgevoerd waarbij voetgangersstromen gemodelleerd en gesimuleerd zijn. Binnen Incontrol Enterprise Dynamics is er behoefte aan een ‘externe blik’ om de huidige methodiek van voetgangerssimulatie te bekritisieren en waar mogelijk op een gestructureerde manier te verbeteren. Tevens is Incontrol Enterprise Dynamics voor bepaalde vraagstukken op zoek naar additionele functionaliteit.

Opdrachtschrijving: het ontwerpen en ontwikkelen van een simulatiebibliotheek speciaal voor het modelleren van voetgangersstromen.

Methode van aanpak

Ik ben mijn stage begonnen met een analysefase. Het doel van die analysefase was om het probleem nader te analyseren. Tijdens die fase zijn de volgende activiteiten uitgevoerd:

- vergaring van literatuur over voetgangersstromen in het algemeen en over het simuleren van voetgangers,
- interne informatievergaring om een goed beeld te krijgen van wat er reeds binnen Incontrol gedaan is op het gebied van voetgangersstromen,
- externe informatievergaring om een beeld te krijgen van wat er tot nu toe door externe partijen is gedaan op het gebied van voetgangersstromen,
- vergelijking van op de markt verkrijgbare simulatietools met drie voetgangersmodellen die door Incontrol ontwikkeld zijn.

Incontrol heeft tijdens tal van projecten voetgangersmodellen voor verschillende doeleinden ontwikkeld: haalbaarheidsstudies, capaciteitsstudies en

planningsdoeleinden. De door Incontrol ontwikkelde simulatiemodellen behoren niet tot een bepaald type voetgangersmodel en geen van de modellen is te classificeren als een microscopisch voetgangersmodel.

De belangrijkste conclusie dat ik aan het eind van de analysefase heb kunnen trekken is dat gebleken is dat er binnen Incontrol geen document beschikbaar was waarin het concept voor de simulatie van voetgangersstromen beschreven staat. Alvorens verder te kunnen gaan met het ontwerp van de simulatiebibliotheek was het noodzakelijk dat het concept er eerst kwam te liggen. Na de analysefase heb ik een concept ontwikkeld waarmee het mogelijk is om het loopgedrag van voetgangers op verschillende detailniveau's te simuleren. Vernieuwend aan dat concept is dat het loopgedrag nu ook op microscopisch niveau gesimuleerd kunnen worden, gebruikmakend van een cellulaire automaten model. Bij dit type model is het loopgebied opgedeeld in een aantal vierkante cellen en in één zo'n cel kan hoogstens één voetganger staan. Voetgangers verplaatsen zich op basis van (gedrags)regels.

► **INHOUDSOPGAVE**

Managementuittreksel	iii
1 Inleiding	1
1.1 <i>Incontrol Enterprise Dynamics</i>	1
1.2 <i>Probleembeschrijving</i>	1
1.3 <i>Opdrachtschrijving</i>	1
1.4 <i>Opbouw van het document</i>	2
2 Inleidende begrippen	3
2.1 <i>Karakteristieken van voetgangersstromen</i>	4
2.1.1 De loopsnelheid	4
2.1.2 De dichtheid	4
2.1.3 De doorstromingsgraad	4
2.1.4 Doorlooptijd	5
2.1.5 Tussentijd	5
2.1.6 Vertragingstijd	5
3 Typologie van voetgangersmodellen	7
3.1 <i>Macroscopische voetgangersmodellen</i>	7
3.2 <i>Microscopische voetgangersmodellen</i>	7
3.3 <i>Mesoscopische voetgangersmodellen</i>	7
3.4 <i>Overzicht ontwikkelde voetgangersmodellen</i>	8
3.4.1 Het model van Greenshields	8
3.4.2 Het LWR stroommodel	10
3.4.3 Gas-kinetische modellen	10
3.4.4 Cellulaire Automaten Modellen	10
3.4.5 Benefit Cost Cellular Model	11
3.4.6 Magnetic Force Model	11
3.4.7 Social Force Model	12
3.4.8 Queuing Network Model	12
4 Simulatie en voetgangersstromen	14
4.1 <i>Simulatie door de jaren heen</i>	14
4.2 <i>Vormen van simulatiemodellen</i>	15
4.2.1 Discrete modellen	16
4.2.2 Continue modellen	16
4.2.3 Statische modellen	16
4.2.4 Dynamische modellen	16
4.2.5 Deterministische modellen	17
4.2.6 Stochastische modellen	17

4.2.7	Voor- en nadelen van simulatie	17
5	Opzet van het onderzoek	20
5.1	<i>Methoden van Aanpak</i>	20
5.1.1	Resultaten analysefase	20
5.1.2	Conclusie analysefase	23
5.1.3	Verder verloop van de stage	24
6	Het modelleren van voetgangersbewegingen	26
6.1	<i>Een eendimensionale weg</i>	26
6.1.1	Modelbeschrijving	27
6.2	<i>Een tweedimensionale eenrichtingsweg</i>	28
6.3	<i>Algemene modelformulering van eenrichtingsverkeer</i>	32
6.4	<i>Het simuleren van tweerichtingsverkeer</i>	35
6.5	<i>Een 4-stromen voetgangersmodel</i>	38
6.6	<i>Een voetgangersmodel met acht richtingen</i>	41
6.7	<i>Het A* algoritme</i>	42
6.7.1	A* versus het algoritme van Dijkstra	45
6.8	<i>Validatie van het model</i>	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
7	Concept voetgangerssimulatie	48
8	Conclusie	54
	Bijlage A: Afleiding van vergelijking 2	56
	Bijlage B: Illustratie van het voorkomen van doodlopende situaties	58
	Bijlage C: Regels voor het modelleren van tweerichtingsverkeer	61
	Bijlage D: Aangepast A* algoritme	63
	Literatuurlijst	65

► 1 INLEIDING

1.1 Incontrol Enterprise Dynamics

Incontrol Enterprise Dynamics is sinds 1984 een *simulation solution provider* en heeft vestigingen in Nederland en Duitsland. Haar hoofdkantoor is gevestigd in Maarssen. Ze is internationaal opererend: via partners levert ze producten en diensten wereldwijd.

Incontrol Enterprise Dynamics bouwt, ontwikkelt en verkoopt software onder de naam Enterprise Dynamics®. Daarnaast levert ze diensten op het terrein van simulatie, zoals consultancy en trainingen. De consultancy betreft onder andere het bouwen van simulatieomgevingen en het uitvoeren van simulatiestudies voor zowel het bedrijfsleven (o.a. luchthavens, spoorwegmaatschappijen, call centers, recreatiecentra, banken, telecommunicatiebedrijven en staalfabrieken) als voor overheden.

1.2 Probleembeschrijving

Incontrol Enterprise Dynamics voert al geruime tijd projecten uit voor haar klanten. De projecten betreffen onder andere het uitvoeren van capaciteits- en haalbaarheidsstudies. Bij het uitvoeren van de projecten wordt gebruik gemaakt van simulatie. Bij het ontwikkelen van de simulatiemodellen wordt er gebruik gemaakt van het simulatiepakket Enterprise Dynamics®. Het pakket bevat standaard bibliotheken waarin ‘atomen’ zijn opgenomen. Deze atomen zijn voorgedefinieerde bouwstenen (bijvoorbeeld producten, machines, loketten en lopende banden) die gebruikt kunnen worden bij de bouw van simulatiemodellen. Daarnaast zijn er bibliotheken ontwikkeld voor specifieke expertise gebieden:

- de Airport Suite voor het simuleren van luchthavenprocessen;
- de Logistic Suite voor productie, distributie en material handling;
- de Educational Suite voor opleidingsdoeleinden.

Incontrol Enterprise Dynamics heeft ruime ervaring op het gebied van voetgangersstromen; ze heeft tal van projecten uitgevoerd waarbij voetgangersstromen gemodelleerd en gesimuleerd worden. Binnen Incontrol Enterprise Dynamics is er behoefte aan een ‘externe blik’ om de huidige methodiek van voetgangersssimulatie te bekritisieren en waar mogelijk op een gestructureerde manier te verbeteren. Tevens is Incontrol Enterprise Dynamics voor bepaalde vraagstukken op zoek naar additionele functionaliteit.

1.3 Opdrachtomschrijving

De stageopdracht wordt als volgt geformuleerd:

Het ontwerpen en ontwikkelen van een simulatiebibliotheek speciaal voor het modelleren van voetgangersstromen.

1.4 Opbouw van het document

De hoofdstukken 2 tot en met 4 hebben een inleidend karakter.

Hoofdstuk 2 bespreekt enkele resultaten van studies die verricht zijn naar voetgangersstromen. In dat hoofdstuk wordt nader ingegaan op de belangrijkste karakteristieken van voetgangersstromen.

Hoofdstuk 3 gaat nader in op modellen die ontwikkeld zijn voor voetgangersverkeer. Door voetgangersstromen onder te verdelen naar modelleringstechniek ontstaan er drie type voetgangersmodellen: macro-, meso- en microscopische voetgangersmodellen. Deze type modellen worden in dat hoofdstuk besproken. Ook wordt er in hoofdstuk 3 een overzicht gegeven van in de literatuur beschreven voetgangersmodellen die reeds ontwikkeld zijn.

In hoofdstuk 5 wordt in gegaan op mijn onderzoeksapproach. Er wordt een overzicht gegeven van de werkzaamheden die ik tijdens mijn stage heb uitgevoerd.

Een van de dingen die ik tijdens mijn stage heb gedaan, was het ontwikkelen en implementeren van een model. Dat model wordt in hoofdstuk 6 uitvoerig besproken.

► 2 INLEIDENDE BEGRIPPEN

Heel het onderzoek naar voetgangersstromen is gebaseerd op observaties en empirische studies. De studies naar voetgangersstromen hebben betrekking op het observeren en vastleggen van voetgangersbewegingen (dataverzameling) en het beter begrijpen van de geobserveerde situaties om vervolgens bestaande theorieën uit te breiden en nieuwe theorieën te ontwikkelen (voetgangersanalyse). De volgende zaken zijn van belang in de theorie over voetgangersstromen:

- snelheid: de afstand die per tijdseenheid wordt afgelegd,
- dichtheid: het aantal voetgangers per oppervlakte loopruimte,
- doorstromingsgraad: het aantal voetgangers dat een bepaald punt binnen een gegeven tijdsperiode passeert,
- doorlooptijd: de tijd die nodig is om een vastgestelde afstand af te leggen
- tussentijd: het tijdsinterval dat verstrijkt tussen het passeren van twee opeenvolgende voetgangers.

Op basis van de theorieën worden modellen ontwikkeld. Vooral simulatiemodellen, die moeten voorspellen hoe voetgangers zich gedragen, worden gebruikt. In hoofdstuk 3 wordt nader ingegaan op de voetgangersmodellen die ontwikkeld zijn.

Hieronder worden enkele resultaten van studies en observaties opgesomd. De basis voor dit materiaal komt uit [7].

- Voetgangers kiezen de snelste route naar hun eindbestemming en laten een sterke afkeer zien tegen het maken van omwegen, ook al is het overvol op de directe route.
- Voetgangers lopen met een individuele gewenste snelheid die overeenkomt met de meest comfortabele loopsnelheid. Henderson ontdekte dat de gewenste loopsnelheid normaal verdeeld is met een gemiddelde van 1.34 meter per seconde en een standaarddeviatie van 0.26 meter per seconde. De loopsnelheid kan variëren en wordt beïnvloed door een aantal factoren. Deze factoren zijn onder andere: leeftijd, geslacht, lichamelijke condities, omgevingsfactoren (drukke, tijdstip van de dag, temperatuur, enz.) en het doel van de wandeling (snel de trein halen, winkelen, enz.).
- Voetgangers houden een zekere afstand tot andere voetgangers, stoepranden, muren en obstakels. Deze afstand wordt kleiner als een voetganger haast heeft en als het aantal voetgangers toeneemt. Uit de resultaten beschreven in [5] blijkt dat personen in drukke ruimten eerder geneigd zijn om de afstand tot personen die voor hun lopen te reduceren dan de afstand tot personen die naast hun lopen.
- Voetgangers die elkaar kennen kunnen groepen vormen die zich net als individuele voetgangers gedragen. De grootte van de groepen is Poisson-verdeeld.
- Personen zijn vaak geneigd om een hoeveelheid ruimte om zich heen voor zich zelf te reserveren. Deze hoeveelheid ruimte kan gezien worden als een soort van veiligheidszone. Personen voelen zich comfortabel zo lang andere personen zich

niet in hun veiligheidszone bevinden. Hoe drukker het wordt des te minder comfortabel gaan personen zich voelen.

2.1 *Karakteristieken van voetgangersstromen*

In deze paragraaf worden de belangrijkste karakteristieken (zoals loopsnelheid, dichtheid en doorstromingsgraad) van voetgangersstromen besproken.

2.1.1 *De loopsnelheid*

Iedere persoon p heeft een bepaalde loopsnelheid v_p waarmee hij zich vooruit beweegt. Daarnaast hebben personen een zogenaamde wenssnelheid $v_{p,\max}$ die ze proberen aan te houden. Er geldt dus dat $v_p \leq v_{p,\max}$.

De gemiddelde loopsnelheid (V) kan op twee verschillende manieren berekend worden:

- door het rekenkundig gemiddelde te bepalen van de loopsnelheden van voetgangers die gedurende een bepaalde tijdsperiode gepasseerd zijn. Deze gemiddelde snelheid wordt ook wel de *time mean speed* genoemd [17].
- aan de hand van de gemiddelde tijd die voetgangers erover doen om een bepaalde afstand af te leggen. In de literatuur wordt deze gemiddelde snelheid wordt ook wel de *space mean speed* genoemd.

2.1.2 *De dichtheid*

De dichtheid (D) is het aantal voetgangers per oppervlakte loopruimte. Vaak wordt er gebruik gemaakt van de inverse van de dichtheid: de hoeveelheid oppervlakte per voetganger.

2.1.3 *De doorstromingsgraad*

De doorstromingsgraad (q) is het aantal voetgangers dat een bepaald punt binnen een gegeven tijdsperiode passeert. Vaak wordt het uitgedrukt in het aantal voetgangers per tijdseenheid per breedte van de loopruimte. In dit geval kan de term doorstromingsgraad vertaald worden naar het aantal voetgangers dat een denkbeeldige lijn binnen een gegeven tijdsperiode passeert. Als w de breedte van een loopruimte aangeeft en er N voetgangers gedurende een tijdsperiode T door die ruimte zijn heen gegaan, dan is de doorstromingsgraad q gelijk aan:

$$q = \frac{N}{T * w} \quad (1)$$

De doorstromingsgraad kan ook berekend worden door het product te nemen van de gemiddelde snelheid V (bijv. in m/min.) van de voetgangers en de gemiddelde dichtheid D (bijv. in aantal voetgangers/m²):

$$q = V * D. \quad (2)$$

Deze vergelijking staat ook wel bekend als de fundamentele vergelijking die de drie grootheden doorstromingsgraad q , snelheid V en dichtheid D met elkaar in verband brengt.

2.1.4 Doorlooptijd

De doorlooptijd $f(a, v_p)$ is de tijd die een voetganger p erover doet om een bepaalde afstand a af te leggen en is afhankelijk van de loopsnelheid v_p van de voetganger.

Deze doorlooptijd is gelijk aan $\sum_{i=1}^N \frac{a_i}{v_p^{(i)}}$. Omdat de snelheid van een voetganger varieert wordt de afstand opgedeeld in N kleine stukken en aangenomen wordt dat de snelheid $v_p^{(i)}$ in stuk i constant is.

2.1.5 Tussentijd

Met de tussentijd, ook wel *headway* genoemd, wordt de tijd tussen twee opeenvolgende voetgangers die in dezelfde richting lopen bedoeld. Voor twee voetgangers p_k en p_j , waarvan voetganger p_j voorop loopt, wordt de tussentijd

$h_{k,j}$ als volgt bepaald: $h_{k,j} = \frac{(x_k - x_j)}{v_k}$, $x_k(x_j)$ is de positie van voetganger

$p_k(p_j)$. Een 2-seconde *headway* is bijvoorbeeld equivalent met een tussentijd van 2 seconde. Dit betekent dat in een minuut 30 voetgangers een bepaald punt passeren.

2.1.6 Vertragingstijd

De vertragingstijd d_p is het verschil in tijd dat ontstaat als een voetganger p met zijn wenssnelheid $v_{p,max}$ en zijn gemiddelde snelheid \tilde{v}_p loopt:

$$d_p = f(a, \tilde{v}_p) - f(a, v_{p,\max}).$$

► 3 TYPOLOGIE VAN VOETGANGERSMODELLEN

Ten aanzien van de modelleringstechniek kunnen voetgangersmodellen in drie categorieën worden onderverdeeld: macro-, meso- en microscopische modellen. In de volgende paragrafen wordt van elk van de modellen een beschrijving gegeven. In paragraaf 3.4 wordt een overzicht gegeven van in de literatuur beschreven voetgangersmodellen die reeds ontwikkeld zijn.

3.1 Macroscopische voetgangersmodellen

Macroscopische voetgangersmodellen zijn in grote mate vergelijkbaar met eendimensionale macroscopische modellen voor autoverkeer. Ze beschrijven de stroom als ware het een vloeistof die door een ruimte stroomt. Er worden geen “losse” voetgangers onderscheiden. Alle voetgangers zijn hetzelfde en vertonen hetzelfde gedrag. Bij macroscopische modellen wordt gebruik gemaakt van algemene formules om de voetgangersstroom te beschrijven. Het gedrag van voetgangers wordt meestal beschreven als functie van (gemiddelde) dichtheden en snelheden.

Voorbeelden van macroscopische modellen zijn het model van Greenshields (zie paragraaf 3.4.1) en het model van Greenberg [6].

3.2 Microscopische voetgangersmodellen

In tegenstelling tot macroscopische voetgangersmodellen beschrijven microscopische voetgangersmodellen het voetgangersverkeer zeer gedetailleerd. Microscopische voetgangersmodellen beschouwen iedere voetganger afzonderlijk. Iedere voetganger heeft zijn eigen karakteristieken zoals snelheid, looprichting, enz., en zijn gedrag wordt beschreven als functie van het gedrag van andere voetgangers in de nabije omgeving.

Microscopische voetgangersmodellen kunnen in de volgende drie categorieën worden onderverdeeld:

- celgebaseerde modellen,
- fysische modellen,
- netwerken van wachtrijen.

3.3 Mesoscopische voetgangersmodellen

Mesoscopische voetgangersmodellen zijn gedetailleerder dan macroscopische voetgangersmodellen maar minder gedetailleerd dan microscopische modellen. Net als bij microscopische modellen worden individuele voetgangers (of groepen) in het model meegenomen, maar hun gedrag wordt net als bij macroscopische modellen beschreven als functie van (gemiddelde) dichtheden en snelheden.

3.4 Overzicht ontwikkelde voetgangersmodellen

Er zijn verschillende modellen ontwikkeld die het gedrag van voetgangers beschrijven: gas-kinetische modellen, celgebaseerde modellen, fysische modellen en netwerkmodellen. In tabel 1 wordt een overzicht gegeven van verschillende type voetgangersmodellen die ontwikkeld zijn [17]. In de volgende subparagrafen zal op elk type model nader worden ingegaan.

	Microscopisch	Mesoscopisch	Macroscopisch	Continu	Discreet
Het model van Greenshield			X		
LWR			X	X	
Gas-kinetisch model		X		X	
<u>Cellular Based</u>					
Cellular Automata	X				X
Benefit Cost	X				X
<u>Physical Based</u>					
Magnetic Force	X			X	
Social Force	X			X	
<u>Queuing Network</u>	X				X

Tabel 1: typologie van ontwikkelde voetgangersmodellen

3.4.1 Het model van Greenshields

Greenshields [6] vond in 1935 op grond van verkeersmetingen het volgende lineaire verband tussen de snelheid V en de dichtheid D :

$$V = V_{\max} * \left(1 - \frac{D}{D_{\max}}\right). \quad (3)$$

Hierbij geldt:

- V_{\max} : de snelheid als $D=0$. Deze snelheid wordt ook wel de vrije loopsnelheid (*free flow speed*) genoemd.
- D_{\max} : de dichtheid waarbij de ruimte helemaal vol staat met mensen. Deze dichtheid wordt ook wel de opstoppingsdichtheid (*jam density*) genoemd.

Vertaald in woorden zegt het lineaire verband dat de snelheid V afneemt naarmate de dichtheid D hoger wordt.

Op basis van de fundamentele vergelijking (2) en het lineaire verband tussen snelheid en dichtheid (3) leidde Greenshields in 1935 de volgende parabolische vergelijking af voor het verband tussen de snelheid en de doorstromingsgraad:

$$q = D_{\max} * \left(V - \frac{V^2}{V_{\max}} \right). \quad (4)$$

Ondanks dat het model van Greenshields een van de oudste modellen is, wordt het nog vaak gebruikt [17].

3.4.1.1 Afleidingen van het model van Greenshields

Op basis van de vergelijkingen (2), (3) en (4) kunnen de volgende verbanden afgeleiden worden:

- het verband tussen de dichtheid en de snelheid,
 - het verband tussen doorstromingsgraad en dichtheid.
- Volgens vergelijking (3) kan de dichtheid D uitgedrukt worden als

$$D = D_{\max} * \left(1 - \frac{V}{V_{\max}} \right), \quad (5)$$

en het verband tussen doorstromingsgraad q en dichtheid D wordt beschreven door:

$$q = V_{\max} * \left(1 - \frac{D}{D_{\max}} \right) * D. \quad (6)$$

De doorstromingsgraad neemt toe tot een maximale doorstromingsgraad q_{\max} bereikt is. Vervolgens neemt de doorstromingsgraad af tot de voetgangers stil staan bij een dichtheid van D_{\max} .

Voor de maximale doorstromingsgraad q_{\max} kan de uitdrukking

$$q_{\max} = \frac{V_{\max} * D_{\max}}{4}, \quad (7)$$

worden gegeven door vergelijking (3) in vergelijking (2) in te vullen. In bijlage A wordt een afleiding van vergelijking (7) gegeven.

3.4.2 Het LWR stroommodel

Lighthill en Whitham (1955) en Richards (1956) ontwikkelde onafhankelijk van elkaar het eerste dynamische verkeersstroommodel [13]. Het model beschrijft de stroom als ware het een eendimensionale vloeistof en het verkeer wordt beschreven in termen van de drie grootheden doorstromingsgraad q , snelheid V en dichtheid D .

Het model is gebaseerd op de continuïteitsvergelijking

$$\frac{\partial D(t)}{\partial t} + \frac{\partial q(t)}{\partial t} = 0, \quad (10)$$

die het behoud van het aantal voetgangers in een bepaalde ruimte zonder in- en uitgangen beschrijft.

In het model wordt verondersteld dat de snelheid (en dus ook de doorstromingsgraad) een functie van de dichtheid is:

$$V = f(D). \quad (11)$$

De functie $f(D)$ is een willekeurige functie en voor deze functie kan bijvoorbeeld Greenshields lineaire vergelijking gebruikt worden die het verband tussen de snelheid en de dichtheid weergeeft (zie vergelijking (3)).

3.4.3 Gas-kinetische modellen

Een voorbeeld van een mesoscopisch model zijn gas-kinetische modellen. In dit type modellen wordt de voetgangersstroom beschreven als een gas bestaande uit "menselijke" gasdeeltjes. Aangenomen wordt dat de bewegingen van de gasdeeltjes chaotisch is en waardoor de snelheden en posities van die deeltjes niet precies bepaald kunnen worden. In plaats daarvan worden ze bepaald door gebruik te maken van een *fase-ruimte* dichtheid

$$\tilde{\rho}(x, v, t) = \rho(x, t) * \tilde{P}(v, x, t),$$

die gelijk is aan het product van de dichtheid en de waarschijnlijkheidsdichtheid van snelheden v op plaats x en tijdstip t .

Deze functie kan geëvalueerd worden door gebruik te maken van de vergelijking van Boltzmann. Deze vergelijking beschrijft de verandering van de fase-ruimte dichtheid voor een gasdeeltje.

3.4.4 Cellulaire Automaten Modellen

Het cellulaire automaten modellen zijn in eerste instantie ontwikkeld om autoverkeer te simuleren. Sinds een aantal jaar wordt dit type model naast autoverkeer ook voor voetgangersverkeer gebruikt. Blue en Adler hebben verschillende cellulaire automaten modellen ontwikkeld om voetgangersstromen te simuleren [17].

Bij dit type model is het loopgebied opgedeeld in een aantal vierkante cellen en in één zo'n cel kan hoogstens één voetganger staan. Voetgangers verplaatsen zich op basis van (gedrags)regels. Tijdens mijn stage heb ik een cellulaire automaten model ontwikkeld dat gebaseerd is op de modellen van Blue & Adler. Het model wordt in hoofdstuk 5 besproken.

3.4.5 Benefit Cost Cellular Model

Het Benefit Cost Cellular Model is door Gipps en Marksjo ontwikkeld [17]. Net als bij de cellulaire automaten modellen wordt het loopgebied opgedeeld in een aantal vierkante cellen en in één cel kan ten hoogste een voetganger staan. Afhankelijk van het aantal voetgangers in de buurt wordt aan elke cel een score toegekend. Deze score representeert de winst die voetgangers maken om hun doel te bereiken. Voetgangers zullen naar de cel gaan die hun een maximale netto winst opleveren.

3.4.6 Magnetic Force Model

Het *Magnetic Force Model* is door professor Okazaki, een architect, ontwikkeld [17]. Dit model is door hem ontwikkeld om meer inzicht te krijgen in de relatie tussen ruimte en voetgangersgedrag, aan de hand waarvan het ontwerp van gebouwen verbeterd konden. Verder is het model gebruikt om:

- een evacuatie in geval van brand te simuleren,
- voetgangersbewegingen in een gedeelte van een metrostation te simuleren,
- voetgangersbewegingen op de begane grond van een hotel te simuleren.

In dit model worden voetgangers en obstakels gezien als geladen deeltjes; voetgangers en obstakels zijn positief geladen en de eindbestemmingen waar voetgangers naar toe lopen zijn negatief geladen. Voetgangers worden als het ware aangetrokken door deeltjes met een negatieve lading. Op elke voetganger werken twee krachten: een magnetische kracht en een kracht om botsingen met andere voetgangers of obstakels te voorkomen. De magnetische kracht tussen twee objecten wordt met de wet van Coulomb bepaald:

$$\vec{F} = \frac{k * q_1 * q_2 * \vec{r}}{r^2}$$

Waarbij:

- \vec{F} de magnetische kracht is (vector),
- k een constante is,
- q_1 de lading is van een voetganger,

- q_2 de lading is van een geladen deeltje (een andere voetganger of een obstakel),
- \vec{r} de vector is van een voetganger naar een geladen deeltje,
- r de lengte is van \vec{r} .

Als q_1 en q_2 dezelfde teken hebben is de resulterende kracht negatief en daarom zullen de twee objecten elkaar afstoten. Als q_1 en q_2 verschillende tekens hebben (positief teken voor de voetganger en negatief teken voor zijn eindbestemming) zal de voetganger zich in de richting van zijn eindbestemming bewegen.

3.4.7 Social Force Model

Het Social Force Model is ontwikkeld door professor Helbing, een natuurkundige die het model gebruikte om meer inzicht te krijgen in het paniekgedrag van voetgangers. Het model is gebaseerd op de aanname dat iedere voetganger de intentie heeft om op een bepaald tijdstip een bepaalde eindbestemming te bereiken. In dit model zijn voetgangers onderhevig aan sociale krachten. Deze krachten geven de sterkte aan van de motivatie van een voetganger om zich naar zijn eindbestemming te bewegen.

Het *Social Force* model bestaat uit verschillende krachten die verschillende invloeden representeren waar voetgangers in werkelijkheid aan onderhevig zijn. De som van al die verschillende krachten leidt tot bewegingen van een voetganger:

$$\frac{d\vec{v}_\alpha}{dt} = \vec{f}_\alpha^0 + \sum_\beta \vec{f}_{\alpha\beta} + \sum_b \vec{f}_{ab} + \sum_i \vec{f}_{\alpha i} + \sum_\beta \vec{f}_{\alpha\beta}^{att} + \varepsilon .$$

De kracht \vec{f}_α^0 reflecteert de motivatie van een voetganger om met de gewenste loopsnelheid naar zijn gewenste eindbestemming toe te gaan.

De interactie tussen voetgangers worden door twee type krachten beschreven: een socio-psychologische ($\vec{f}_{\alpha\beta}^{soc}$) kracht en fysische interacties ($\vec{f}_{\alpha\beta}^{sh}$):

$$\vec{f}_{\alpha\beta} = \vec{f}_{\alpha\beta}^{soc} + \vec{f}_{\alpha\beta}^{ph} .$$

De kracht \vec{f}_{ab} representeert de interacties tussen een voetganger α en een obstakel of wand b .

De kracht $\vec{f}_{\alpha i}$ representeert attracties (bijvoorbeeld winkelramen of speciale attracties) die het gedrag van voetgangers kunnen beïnvloeden.

In het model wordt ook het vormen van groepen meegenomen. Dit wordt gedaan door een aantrekkende kracht $\vec{f}_{\alpha\beta}^{att}$ van een voetganger β op een andere voetganger α . Verder is wordt er nog een fluctuatieterm ε die normaal verdeeld is meegenomen.

3.4.8 Queuing Network Model

In de wachttijdtheorie wordt een model bestudeerd waarin klanten een systeem binnenkomen volgens een bepaald aankomstproces, daar een zekere bediening krijgen

(bedieningsproces) en vervolgens het systeem weer verlaten. Als de bedienden bezet zijn, dan moeten de klanten in een wachtrij plaatsnemen. Deze wachtrij kan een beperkt aantal plaatsen hebben. Als er een nieuwe klant arriveert terwijl de wachtrij vol is, dan zal deze klant zonder bediening ontvangen te hebben het systeem weer verlaten.

Wachtrijmodellen worden voornamelijk gebruikt bij de simulatie van evacuaties. Voetgangers lopen over een netwerk van knooppunten en verbindingen daartussen. De knooppunten representeren ruimtes en de verbindingen representeren deuren. Elke voetganger heeft een eindbestemming die hij zo snel en zo veilig mogelijk wilt bereiken. Aangekomen in een knooppunt moet de voetganger een keuze maken uit de mogelijke verbindingen waar hij vervolgens naar toe zal gaan. Vanuit een knooppunt gaat hij via een verbinding (waar voetgangers in een wachtrij staan) naar een ander knooppunt. In elk knooppunt wordt de evacuatietijd (de tijd die hij erover doet om het gebouw te verlaten) bijgehouden.

► 4 SIMULATIE EN VOETGANGERSSTROMEN

Simulatie kan omschreven worden als het nabootsen van een systeem uit de werkelijkheid met behulp van modellen. Steeds vaker wordt simulatie toegepast om voetgangersbewegingen te simuleren. Het doel van de simulatie hangt af van het onderwerp van studie. Voetgangersstromen kunnen voor verschillende doeleinden gesimuleerd worden:

- om inzicht te krijgen in de veiligheid van infrastructuur (luchthavens, schepen, stadions, stations, theaters, winkelcentra, enz.), bijvoorbeeld in het geval van evacuaties,
- om ontwerpideeën voor complexe omgevingen te toetsen op normen en berekeningen, vooral bij het evalueren van ontwerpen die nog niet eerder in de praktijk zijn gerealiseerd. Voetgangersstromen kunnen ook gesimuleerd worden om inzicht te krijgen in de effecten van ontwerpideeën op de voetgangersstromen zelf,
- om capaciteiten te bepalen.

In dit hoofdstuk zal een overzicht worden gegeven over simulatie in het algemeen. In paragraaf 4.1 zal er wat verteld worden over de geschiedenis van simulatie. Dit stuk tekst is afkomstig uit [9]. Vervolgens worden in paragraaf 4.2 verschillende type simulatiemodellen besproken.

4.1 Simulatie door de jaren heen

Tijdens de opkomst van methoden en technieken voor Operations Research in de naoorlogse jaren werd simulatie beschouwd als een laatste redmiddel wanneer met analytische methoden geen oplossing kon worden geboden.

In de jaren '60 was simulatie nog een kostbaar en gespecialiseerd middel dat voornamelijk werd gebruikt door grote bedrijven voor het ondersteunen van beslissingen aangaande grote kapitaalinvesteringen. De modellen werden door groepen van specialisten ontwikkeld in 3^e generatie programmeertalen. Het programmeren van een model was een tijdrovende en kostbare aangelegenheid mede door de beperkte "rekenkracht" van computers.

Naarmate de kracht toenam en de prijzen van computers daalden nam het gebruik van simulatie in de jaren '70 toe. Computersimulatie werd vooralsnog gebruikt voor het ontdekken van "fouten" van systemen waarvan de performance tegen viel, of niet overeenstemde met de verwachtingen.

Gedurende de jaren '80 begon het gebruik van simulatie zich te ontwikkelen in het bedrijfsleven. Dit kwam met name door de opkomst van de personal computer, alsmede de ontwikkeling van 4^e generatie programmeertalen op het gebied van simulatie. Deze 4^e generatie talen maken het mogelijk om een model op te bouwen met bepaalde objecten, hun eigenschappen en de verbanden tussen de objecten, dit in tegenstelling tot 3^e generatie talen waarbij tevens grote kennis is vereist over de onderliggende programmeercode. De simulatiesoftware wordt steeds eenvoudiger te

leren en te gebruiken waardoor de drempel voor nieuwe gebruikers lager komt te liggen.

Vanaf begin jaren '90 wordt het gebruik van simulatie als beslissingsondersteunend instrument als zeer waardevol beschouwd door het bedrijfsleven. Analyses werden uitgevoerd met behulp van simulatie in ontwerpfasen van bedrijfssystemen en voorafgaand aan systeemveranderingen. Animatie van bedrijfsprocessen wordt gebruikt om het systeem te leren kennen en/of beter te begrijpen en de betrokkenheid van personeel bij een systeem(verandering) te vergroten. De compatibiliteit en integratie met andere softwarepakketten maakt het gebruik van simulatiesoftware steeds aantrekkelijker. Door de open architectuur van software kunnen databases direct benaderd worden, instellingen kunnen opgegeven worden in een gebruiksvriendelijk menu en resultaten kunnen automatisch worden opgemaakt in een spreadsheetprogramma.

Een andersoortige toepassing die in deze tijd wordt gebruikt is vluchtsimulatie met als doel piloten op te leiden en te trainen op rampscenario's. In een breder perspectief kan een vluchtsimulatie opgevat worden als een simulatie-experiment waarbij de bestuurder of controller van een systeem de processen aanstuurt en evalueert wat de effecten van zijn maatregelen zijn. Hierdoor wordt een beter inzicht met betrekking tot het systeem verkregen en de betrokkenheid vergroot. Deze vorm van simulatie wordt wel *man-in-the-loop* simulatie genoemd.

De laatste jaren is simulatie een alom gerespecteerd beslissingsondersteunend instrument geworden vooral in die situaties waar het complexe systemen of grote investeringen betreft. Tegenwoordig kunnen modellen zeer snel opgebouwd worden door het gebruik van zogenaamde *templates*. Dit is simulatiesoftware speciaal ontworpen voor een bepaald vakgebied. De software bevat specifieke bouwstenen voor het betreffende vakgebied. Gedacht kan worden aan bijvoorbeeld een railtemplate waarin standaard bouwstenen zijn opgenomen voor stations, wissels, spoorwegovergangen, baanvakken, etc.

Door de steeds toenemende kracht van computers en de open architectuur van software is een logische stap het inzetten van simulatiemodellen voor het besturen van systemen, oftewel real-time simulatie. Simulatiemodellen zullen niet meer eenmalig gebruikt worden maar juist bijgewerkt worden wanneer systeemveranderingen plaatsvinden zodat het model een belangrijk hulpmiddel wordt voor het testen van nieuwe strategieën als er veranderingen plaatsvinden met betrekking tot het operationele systeem. Ook is een trend ingezet waarbij simulatie dient als tool voor het management in het ondersteunen van beslissingen in de operationele fase van een bedrijfssysteem. Het gebruik van simulatie wint nog steeds aan populariteit als het gaat om analyse instrumenten binnen het vakgebied van de Operations Research.

Andere vormen van simulatie, van de laatste jaren, zijn bijvoorbeeld simulatiegames als Simcity™ en virtual reality toepassingen.

4.2 Vormen van simulatiemodellen

Om de prestaties en het gedrag van een systeem te kunnen beschrijven en voorspellen, is een model van dat systeem nodig. Een model is een representatie van een systeem.

Het doel van een model is het beschrijven, beter begrijpen en verbeteren van een systeem. Een model zal altijd alleen de wezenlijk belangrijke eigenschappen van een reëel systeem bevatten. Door deze vereenvoudiging wordt slechts een beperkt aantal componenten en interacties meegenomen. Aspecten van het systeem die niet (veel) bijdragen aan het gedrag dat bestudeerd moet worden, worden niet in een model meegenomen. Een model hoort dus bij een doel waarvoor het is ontwikkeld.

De bij simulatie gebruikte modellen kunnen als volgt geïnclassificeerd worden:

- discreet/continu,
- statisch/dynamisch,
- deterministisch/stochastisch.

Hieronder zal verder ingegaan worden op deze verschillende classificaties.

4.2.1 *Discrete modellen*

Bij discrete simulatiemodellen wordt het gedrag van objecten gesimuleerd op een telbaar aantal momenten in de tijd. Tussen twee momenten in gebeurt er niets. Een voorbeeld van discrete simulatiemodellen zijn *discrete-event* simulatiemodellen. Bij deze modellen vinden op de tijdstippen bepaalde gebeurtenissen (events) plaats.

4.2.2 *Continue modellen*

Bij continue simulatiemodellen wordt het gedrag van componenten continu in de tijd gesimuleerd. Continue simulatiemodellen bevatten meestal een of meerdere differentiaalvergelijkingen die de relaties geven van de mate waarin de toestandvariabelen in de tijd veranderen.

4.2.3 *Statische modellen*

In statische modellen speelt de factor tijd geen rol. Een voorbeeld van een statisch model is een spreadsheet (zoals in Microsoft Excel) waarin de waarde van bepaalde cellen in formulevorm afhangen van de waarde van andere cellen. Als je bepaalde cellen verandert, veranderen de andere cellen mee. Statische simulatie wordt in de literatuur ook wel aangeduid met Monte Carlo simulatie [10].

4.2.4 *Dynamische modellen*

Er wordt van een dynamisch model gesproken indien het model een of meerdere variabelen bevat die in de tijd veranderen. Verreweg de meeste modellen aangaande bedrijfsprocessen zijn dynamisch van aard omdat bijna alle bedrijfsprocessen dynamisch zijn [9].

4.2.5 Deterministische modellen

In deterministische modellen bestaat er geen onzekerheid over de waarde van variabelen. De waarden van variabelen staan vast of veranderen op basis van vaststaande relaties. Het model geeft iedere keer hetzelfde resultaat.

4.2.6 Stochastische modellen

Variabelen die niet met zekerheid beschreven kunnen worden, worden in de vorm van statistische verdelingen weergegeven. Deze stochastische variabelen vertonen dan ook zekere variabiliteit. Te denken valt aan bijvoorbeeld de rijtijd van een bus of de doorlooptijd van een bepaald productieproces.

Door het model meerdere keren toe te passen kan de uitkomst van het model met een bepaalde betrouwbaarheidsinterval weergegeven worden.

4.2.7 Voor- en nadelen van simulatie

Een van de belangrijkste voordelen van simulatie is het kunnen modelleren van complexe systemen zonder daarbij grote concessies hoeven te doen over systeemeigenschappen.

Het gebruik van simulatie is waardevol als het gaat om het vergelijken van systeemvarianten, het zoeken naar kandidaat oplossingen en het voorspellen van prestaties, maar een optimale oplossing zal simulatie niet verschaffen [9]. Goede oplossingen zullen moeten worden bepaald door systeemparameters te variëren en te analyseren wat daarvan het effect is op prestatie-indicatoren.

Andere voordelen van simulatie zijn:

- simulatie is ideaal voor het beantwoorden van zogenaamde *what-if?* vragen; door parameters te variëren is het met simulatie mogelijk om relatief snel en eenvoudig verschillende varianten door te rekenen;
- het is mogelijk processen te bestuderen waarmee geen praktijkproeven gedaan kunnen worden;
- met behulp van animatie kan inzicht vergroot worden in processen en knelpunten.

Ondanks de genoemde voordelen van simulatie zijn er nog een aantal nadelen van simulatie te noemen:

- om optimaal rendement van een simulatietool te verkrijgen is specifieke simulatiekennis vereist,
- de kwaliteit van de uitvoer is sterk afhankelijk van de kwaliteit van de invoer,
- het aanschaffen van benodigde soft- en hardware,
- simulatiemodellen kunnen duur zijn en een lange ontwikkeltijd vereisen,
- met behulp van simulatie worden schattingen in plaats van echte waarden verkregen.

► 5 OPZET VAN HET ONDERZOEK

Zoals eerder vermeld was er binnen Incontrol behoefte aan een ‘externe blik’ om de huidige methodiek van voetgangerssimulatie te bekritisieren en waar mogelijk op een gestructureerde manier te verbeteren. Daarnaast was het aan mij de opdracht om een simulatiebibliotheek speciaal voor het modelleren van voetgangersstromen te ontwerpen en te ontwikkelen.

5.1 *Methode van Aanpak*

Ik ben mijn stage begonnen met een analysefase. Het doel van die analysefase was om het probleem nader te analyseren. Tijdens die fase zijn de volgende activiteiten uitgevoerd:

- vergaring van literatuur over voetgangersstromen in het algemeen en over het simuleren van voetgangers,
- interne informatievergaring om een goed beeld te krijgen van wat er reeds binnen Incontrol gedaan is op het gebied van voetgangersstromen:
 - het vergaren van informatie over de tot nu toe uitgevoerde projecten,
 - het vergaren van informatie over de ontwikkelde simulatiemodellen,
 - het evalueren van een aantal concepten,
 - het houden van interviews met medewerkers.
- externe informatievergaring om een beeld te krijgen van wat er tot nu toe door externe partijen is gedaan op het gebied van voetgangersstromen:
 - informatievergaring over andere verkrijgbare simulatietools waarmee voetgangersstromen gesimuleerd kunnen worden,
 - bezoek aan Goudappel Coffeng, een verkeerskundig bureau, om te praten over voetgangersstromen en welke verwachtingen zij hebben voor de toekomst.

Naast het vergaren van informatie is er een vergelijking gemaakt van op de markt verkrijgbare simulatietools en drie voetgangersmodellen die door Incontrol ontwikkeld zijn.

5.1.1 *Resultaten analysefase*

Incontrol heeft tal van projecten op het gebied van voetgangersstromen uitgevoerd voor met name luchthavens, spoorwegmaatschappijen en recreatiecentra. De door Incontrol ontwikkelde simulatiemodellen zijn voornamelijk voor de volgende doeleinden gebruikt:

- haalbaarheidsstudies: in een vroeg stadium wordt getoetst of het ontwerp van complexe gebouwen voldoet aan vooraf gestelde normen en eisen,
- capaciteitsstudies: onderzocht wordt in hoeverre de capaciteit voldoende is om een bepaalde toestroom mensen te kunnen faciliteren,
- planningsdoeleinden: met een simulatiemodel kan benodigde capaciteit zo goed mogelijk ingezet (toegewezen) worden.

Tijdens de interviews is gebleken dat de geïnterviewden positief naar de toekomst kijken. Door het breder toepassen van de simulatiemodellen en het ontwikkelen van een goed onderbouwd concept die voor elk vraagstuk gebruikt kan worden zal Incontrol anderen een stap voor zijn. Op een enkeling na moet volgens de geïnterviewden een simulatiebibliotheek speciaal voor voetgangers zeker komen omdat daarmee tijdwinst behaald kan worden en het een goede stap is naar de klant toe omdat daarmee aangetoond kan worden dat Incontrol voldoende expertise in huis heeft op het gebied van voetgangersstromen.

Simulatiemodellen

Ik heb drie simulatiemodellen bekeken die tijdens verschillende projecten ontwikkeld zijn. Hieronder wordt een korte een beschrijving gegeven van die projecten.

- **Project 1: Onderzoek gastenstromen**

Europa's grootste trendsetter op het gebied van tussendoor vakanties wil op een van haar parken gaan uitbreiden met 200 extra bungalows. Omdat de bezetting van het zwembad nu al erg hoog is, is de verwachting dat het zwembad het aantal extra bezoekers niet aan kan. Voordat er grote investeringen gedaan worden, wil men eerst onderzoeken wat de effecten op de bezetting van het zwembad zijn.

Tijdens dit project is er een simulatiemodel ontwikkeld waarmee de bezetting van het zwembad inzichtelijk gemaakt wordt en waarmee knelpunten binnen het zwembad zichtbaar worden.

- **Project 2: Loopstromen op de treinstations van de Hoekse Lijn**

Nederlands grootste spoorwegmaatschappij is van plan om in de toekomst te gaan werken met elektronische betaalautomaten en daarvoor moeten de stations worden aangepast. Daarom is de wens ontstaan om per treinstation op de Hoekse lijn studie te verrichten naar (toekomstige) loopstromen en activiteiten van personen om inzicht te verkrijgen in de kwaliteit van het ruimtelijk ontwerp van die stations.

- **Project 3: Self Service Check In**

Op een luchthaven is men bezig om vertrekhallen te voorzien van zogenaamde *self service check-in* kiosken. Door middel van simulatie wordt getracht inzicht te krijgen in de drukte en doorstroming bij verschillende ontwerpvarianten.

De volgende overeenkomsten tussen de bekeken simulatiemodellen kunnen genoemd worden:

- de modellen worden op schaal gebouwd,
- de te simuleren ruimte wordt opgedeeld in twee type gebieden:
 - loopgebieden waarin personen van de ene activiteit naar de andere lopen,

- en gebieden waar personen activiteiten uit kunnen voeren,
- verschillende type personen worden onderscheiden (bijvoorbeeld naar leeftijd of type reiziger),
- personen hebben verschillende karakteristieken (zoals een eindbestemming, loopsnelheid, enz.), afhankelijk van de context waarin het model gebruikt wordt.

Het grootste verschil is dat de simulatiemodellen voor verschillende doeleinden ontwikkeld en gebruikt zijn. Daarnaast behoren de bekeken modellen niet tot een type voetgangersmodel. Zo heb ik geconstateerd dat loopgebieden op twee verschillende manieren gemodelleerd worden:

- net als bij een cellulaire automaten model is de loopruimte opgedeeld in vierkante cellen en personen verplaatsen zich van de ene naar de andere cel,
- binnen de loopruimte wordt een netwerk van paden aangelegd waarover personen zich verplaatsen.

Net als in de fysische modellen wordt in één van de bekeken modellen aangenomen dat activiteiten een bepaalde aantrekkingskracht hebben waarmee ze personen als het ware naar zich toe trekken.

Als sterke kanten van de simulatiemodellen die door Incontrol ontwikkeld zijn noemden de geïnterviewden dat personen individueel worden meegenomen (microscopisch aspect) en dat de gebruikte atomen makkelijk aangepast kunnen worden. Als mindere sterke kanten noemden ze dat het menselijk gedrag niet volledig wordt meegenomen en dat personen in de visualisatie door elkaar heen lopen.

Ontwikkelde atomen

Om snel modellen te kunnen bouwen bevat het simulatieplatform Enterprise Dynamics® (afgekort ED) atomen die als bouwstenen van een simulatiemodel dienen. Deze atomen zijn voorgedefinieerde bouwstenen en kunnen vanuit standaardbibliotheken gehaald worden. Met de binnen ED bestaande programmeertaal 4Dscript is het mogelijk om specifieke elementen uit de werkelijkheid in het simulatiemodel te krijgen.

De atomen die voor de simulatie van voetgangersstromen gebruikt worden zijn afkomstig uit de standaard ED bibliotheek en de ED suites (bibliotheken ontwikkeld voor specifieke expertise gebieden). Daarnaast zijn er al een aantal specifieke atomen (zoals passagier, muur, (rol)trap en winkelgebied) ontwikkeld.

Zoals misschien al eerder duidelijk is geworden, bestaat er nog geen bibliotheek speciaal voor het simuleren van voetgangers. Volgens de geïnterviewden moet die er zeker komen.

Vergelijking verkrijgbare simulatie tools

Op internet ben ik op zoek gegaan naar informatie over verkrijgbare simulatietools waarmee voetgangersstromen gesimuleerd kunnen worden. De hoeveelheid gevonden

informatie verschilde per simulatietool; in het ene geval bleef het tot een brochure bestaande uit één A4 en in het andere geval werd het achterliggend model uitvoerig beschreven. In onderstaand tabel wordt een lijst gegeven van simulatie tools die ik tegen ben gekomen. De volgende simulatie tools heb ik vergeleken met de drie bekeken ED modellen:

- Exodus: een tool dat ontwikkeld is door *de Fire Safety Engineering Group* van de universiteit van Greenwich en waarmee de evacuatie van een groot aantal mensen gesimuleerd kan worden.
- een model van Goudappel Coffeng: een microscopisch model waarmee voetgangersbewegingen rondom een draaideur gesimuleerd wordt om zo de capaciteit van die draaideur te bepalen.
- Micro-PedSim: een microscopisch simulatiemodel dat ontwikkeld is door de Japanner K. Teknomo voor onderzoekdoeleinden. Deze tool is overigens gratis van het internet te downloaden.
- NOMAD: een microscopisch simulatiemodel voor voetgangersverkeer dat ontwikkeld is door Technische Universiteit Delft, Sectie verkeerskunde (Faculteit der Civiele Techniek).
- PAXPORT: ontwikkeld door Halcrow Group Limited en BA plc. Het wordt gebruikt voor de evaluatie en optimalisatie van nieuwe of bestaande terminals in luchthavens en passagiersfaciliteiten.
- Simped: een macroscopisch simulatietool dat ontwikkeld is door ingenieursbureau Holland Railconsult in samenwerking met de Technische Universiteit Delft.

Vergeleken met de bovengenoemde simulatie tools zijn de ED modellen voor een beperkt aantal toepassingsgebieden gebruikt. De andere bekeken simulatietools zijn onder andere gebruikt voor de volgende toepassingsgebieden: binnensteden, bioscopen, evenementen, sporthallen, stadions, supermarkten, theaters, winkelgebieden, schepen en ziekenhuizen.

5.1.2 Conclusie analysefase

De belangrijkste conclusie is dat er tijdens de analysefase is gebleken dat er binnen Incontrol geen document beschikbaar was waarin het concept voor de simulatie van voetgangersstromen beschreven staat. Alvorens verder te gaan met het ontwerp van de simulatiebibliotheek was het noodzakelijk dat het concept er eerst kwam te liggen. Incontrol heeft voor verschillende doeleinden tal van projecten op het gebied van voetgangerssimulatie uitgevoerd. Er kan niet gezegd worden dat de modellen die tijdens de projecten ontwikkeld zijn tot een bepaald type voetgangersmodel behoren. Het ene bekeken model heeft wat weg van een cellulaire automaten model, terwijl in een ander model gebruik wordt gemaakt van krachten waarmee personen naar activiteiten worden toegetrokken.

Een ding staat wel vast: geen van de modellen behoort tot een microscopisch voetgangersmodel. Dat personen in de visualisatie door elkaar heen lopen werd door

de geïnterviewden als een zwak punt gezien. De oorzaak hiervan is dat het microscopisch gedrag tot dusver niet door Incontrol in de modellen is meegenomen.

Incontrol beschikt over een redelijk aantal atomen waarmee voetgangersstromen gesimuleerd kunnen worden.

5.1.3 *Verder verloop van de stage*

Alvorens verder te kunnen gaan met het ontwerp van de simulatiebibliotheek was het noodzakelijk dat het concept er eerst kwam te liggen. Na de analysefase heb ik een concept ontwikkeld waarmee het mogelijk is om voetgangersstromen op verschillende detailniveau's te simuleren. Bij het ontwikkelen van dat concept heb ik de huidige systematiek zoveel mogelijk proberen te handhaven. Vernieuwend aan dat concept is dat het loopgedrag van voetgangers nu ook op microscopisch niveau gesimuleerd kan worden. Voordat ik een microscopisch model kon ontwikkelen heb ik een keuze moeten maken uit de verschillende typen voetgangersmodellen. Dat was een moeilijke klus omdat de modellen meer verschillen dan overeenkomsten vertonen en omdat ik in de literatuur per type model geen voor- en nadelen heb kunnen vinden. Uiteindelijk heb ik om de volgende redenen voor een cellulaire automaten model gekozen:

- Incontrol heeft tot dusver nog geen microscopisch model ontwikkeld,
- Incontrol heeft in het verleden al een model ontwikkeld dat wat weg heeft van een cellulaire automaten model,
- vergeleken met de andere microscopische voetgangersmodellen zijn de regels die in het cellulaire automaten model gebruikt worden begrijpelijk,
- het is relatief makkelijk te implementeren.

Ik wilde een microscopisch model ontwikkelen waarin sprake is van enige interactie tussen voetgangers en waarin voetgangers niet tegen obstakels op lopen. Bekende cellulaire automaten modellen zijn die van Blue & Adler [1][2][3]. Opvallend is dat in die modellen aangenomen wordt dat de te simuleren ruimte waarin voetgangers zich bewegen vrij is van obstakels. Op internet heb ik een algoritme genaamd A* (uitspraak: A-star) gevonden [11] dat de kortste route tussen twee gegeven punten bepaald. Het bijzondere van dit algoritme is dat het rekening houdt met aanwezige obstakels; een gevonden route zal niet door obstakels heen lopen. Vervolgens heb ik een cellulaire automaten model en het A* algoritme gecombineerd waardoor een microscopisch voetgangersmodel, waarin voetgangers netjes om obstakels heen lopen, is ontstaan. Zowel het model als het A* algoritme heb ik in ED geïmplementeerd.

Naast bovengenoemde activiteiten heb ik zowel schriftelijk als mondeling mijn begeleiders en de medewerkers binnen Incontrol op de hoogte gebracht van de voortgang van mijn stage. Dit gebeurde door middel van:

- een tussenrapport dat ik aan het eind van de analysefase opgesteld heb;
- het concept voor voetgangerssimulatie;
- een tussen- en eindpresentatie die ik bij Incontrol Enterprise Dynamics heb gegeven;
- het eindverslag dat u voor u heeft.

► 6 HET MODELLEREN VAN VOETGANGERSBEWEGINGEN

Ik heb een cellulaire automatenmodel beschreven en in Enterprise Dynamics® geïmplementeerd. In dit hoofdstuk wordt dat voetgangersmodel beschreven.

Omdat cellulaire automaten in eerste instantie ontwikkeld zijn voor het autoverkeer wordt in de literatuur vaak een vergelijking gemaakt tussen voetgangers en auto's. Auto's rijden op rijbanen die vaak verdeeld zijn in rijstroken. De auto's in een rijstrook rijden allemaal dezelfde richting op. Dit in tegenstelling tot voetgangers die vrij zijn in te gaan waar ze willen. Door het opleggen van verkeersregels wordt getracht het autoverkeer in goede banen te leiden:

- automobilisten zijn verplicht zoveel mogelijk rechts te houden,
- er zijn voorrangsregels,
- inhalen geschiedt links,
- maximumsnelheden worden opgelegd,
- en er zijn verkeersborden.

Juist omdat er geen regels voor voetgangers zijn, is het modelleren en dus ook het simuleren van voetgangers een moeilijke klus.

Vanwege de complexiteit wordt in paragraaf 6.1 een eenvoudig voetgangersmodel beschreven dat berust op het model van Nagel en Schreckenberg [15]. In [15] wordt een autoweg gesimuleerd als een gesloten systeem; de weg heeft geen begin en geen einde, wat betekent dat auto's op die autoweg blijven rijden. Aan het begin van de simulatie worden er auto's op de autoweg geplaatst en tijdens de simulatie blijft het aantal auto's op die weg constant. In paragraaf 6.2 wordt een algemene modelformulering gegeven voor een eenrichtingsweg. Vervolgens wordt het model voor eenrichtingsverkeer stap voor stap uitgebreid tot een voetgangersmodel waarin voetgangers:

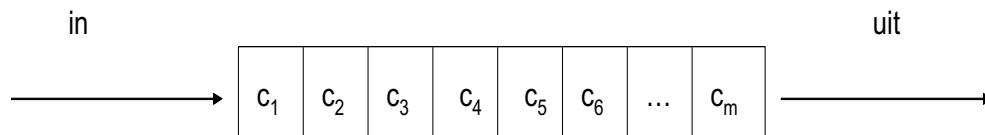
- verschillende loopsnelheden hebben,
- acht verschillende looprichtingen kunnen hebben,
- de mogelijkheid hebben om te reageren op de situatie voor zich,
- niet tegen obstakels op lopen,
- naar een eindbestemming toe lopen.

6.1 Een eendimensionale weg

Het model dat in deze paragraaf beschreven wordt beschrijft een eendimensionale loopruimte waarin de voetgangers achter elkaar dezelfde richting op lopen en waarin zich geen obstakels bevinden.

6.1.1 Modelbeschrijving

De loopruimte wordt gemodelleerd als een rechthoek die onderverdeeld is in m even grote vierkante cellen c_j ($j=1,2,3,\dots,m$) die naast elkaar liggen. Zie onderstaand figuur.



Figuur 1: een eendimensionale weg bestaande uit m cellen

Elke cel c_j kan zich in een van de volgende toestanden $s(c_j)$ bevinden:

$s(c_j) = 0$ als cel c_j leeg is,

$s(c_j) = 1$ als cel c_j bezet wordt gehouden door een voetganger.

Opgemerkt moet worden dat in een cel hoogstens één voetganger kan staan.

In tegenstelling tot het model beschreven in [15] kunnen voetgangers de loopruimte binnentreden en vervolgens weer verlaten, wat betekent dat het aantal voetgangers in de loopruimte niet constant is. Voetgangers betreden de loopruimte via cel c_1 en verlaten het vervolgens weer via cel c_m . In bovenstaand figuur wordt de looprichting met de pijlen aangegeven.

De positie x_p van een voetganger p wordt aangegeven met nummer j , het nummer van de cel c_j waar hij in staat. In het model beweegt een voetganger p zich met een loopsnelheid v_p vooruit.

De loopsnelheid v_p is geheeltallig en geeft het aantal cellen aan waarmee voetganger p per tijdstap T_i ($i=1,2,3, \dots$) vooruit gaat. De loopsnelheid wordt begrensd door een maximumsnelheid v_{\max} die voor alle voetgangers hetzelfde is.

Per tijdstap T_i worden alle voetgangers een voor een afgegaan. Voor elke voetganger wordt zijn nieuwe snelheid v_p bepaald waarmee hij vervolgens v_p cellen vooruit gaat. De snelheid v_p van een voetganger p wordt als volgt bepaald [15]:

$$v_p = \min(v_p + 1, v_{\max}) \quad \text{als } gap(p) \geq v_p + 1,$$

$$v_p = gap(p) \quad \text{anders.}$$

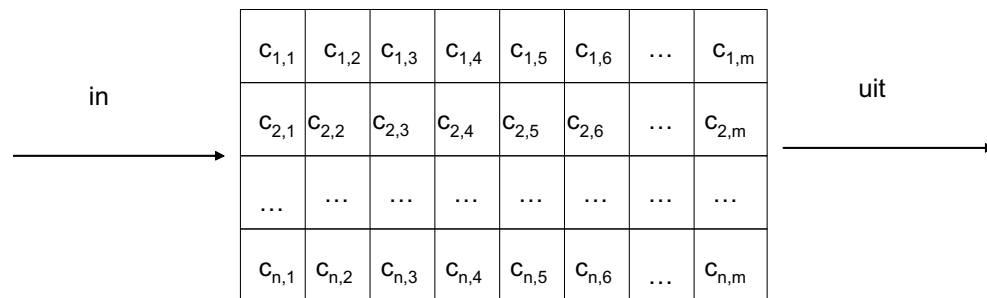
Hierbij is $gap(p)$ het aantal lege cellen voor voetganger p .

De loopsnelheid zal óf toenemen met één als voetgangers genoeg ruimte voor zich hebben en de maximumsnelheid v_{\max} nog niet bereikt is, óf anders afnemen om een botsingen met een voorganger te voorkomen. De voetgangers lopen namelijk in een rij achter elkaar.

6.2 Een tweedimensionale eenrichtingsweg

In tegenstelling tot de loopruimte in de vorige paragraaf bestaat de loopruimte nu uit n naast elkaar liggende rijen, elk bestaande uit m cellen. Een cel $c_{i,j}$ bevindt zich in rij i ($1 \leq i \leq n$) en kolom j ($1 \leq j \leq m$). Verder geldt dat elke cel $c_{i,j}$ zich in een van de volgende toestanden $s(c_{i,j})$ kan bevinden:

$$\begin{aligned} s(c_{i,j}) &= 0 && \text{als cel } c_{i,j} \text{ leeg is,} \\ s(c_{i,j}) &= 1 && \text{als cel } c_{i,j} \text{ bezet wordt gehouden door een voetganger.} \end{aligned}$$



Figuur 2: voorbeeld van een tweedimensionale eenrichtingsweg

Elke voetganger staat op positie $x_p = (x_1, x_2)$, waarbij x_1 (x_2) het nummer aangeeft van de rij (kolom) waarin de voetganger staat. De loopsnelheid v_p is geheel talle en geeft het aantal cellen aan waarmee voetganger p vooruit gaat. De loopsnelheid wordt begrensd door een maximumsnelheid v_{\max} die voor alle voetgangers hetzelfde is.

Alle voetgangers lopen in dezelfde richting en hebben de mogelijkheid om andere voetgangers in te halen, mits $n \geq 2$. Per tijdstap worden alle voetgangers een voor een langs gegaan en voor een voetganger wordt eerst bepaald in welke rij i hij zal gaan lopen en vervolgens wordt de snelheid bepaald waarmee de voetganger vooruit zal gaan. Door de voetgangers een voor een langs te gaan is er sprake van opeenvolgende onderlinge afhankelijkheden. Doordat een voetganger van positie verandert zal er een nieuwe situatie ontstaan, waardoor een volgende voetganger beslissingen zal nemen op basis van die nieuwe situatie. Om de reeks van onderlinge afhankelijkheden te vermijden maken Blue & Adler gebruik van een zogenaamde *parallele update*: eerst wordt voor alle voetgangers de rij waarin ze zullen lopen

bepaald en vervolgens veranderen alle voetgangers van positie, mits de situatie het toelaat [1].

Het bepalen van de rij waarin voetgangers zullen gaan lopen

In tegenstelling tot de loopruimte in de vorige paragraaf hebben personen de mogelijkheid om van rij te veranderen. Het van rij veranderen moet gezien worden als het maken van zijwaartse stappen omdat voetgangers in werkelijkheid niet in rijen lopen. Dit in tegenstelling tot autoverkeer waarbij auto's in rijstroken rijden. Voor het bepalen van de rij waarin een voetganger p zal gaan lopen worden drie regels gebruikt [15]. Alvorens nader in te gaan op deze drie regels worden eerst de volgende variabelen geïntroduceerd:

$gap(p)$: het aantal lege cellen voor voetganger p (in de rij waarin hij loopt),
 $gap_{opp}(p,1)$: het aantal lege cellen voor voetganger p als hij in cel c_{x_1+1,x_2} zou staan,
 $gap_{opp}(p,-1)$: het aantal lege cellen voor voetganger p als hij in cel c_{x_1-1,x_2} zou staan,
 $cell_above$: indicatie of de cel precies boven cel c_{x_1,x_2} tot de loopruimte hoort en vrij of bezet is. $cell_above=-1$ als $x_1 = 1$ en anders is $cell_above$ gelijk aan $s(c_{x_1-1,x_2})$.
 $cell_beneath$: indicatie of de cel precies onder cel c_{x_1,x_2} tot de loopruimte hoort en vrij of bezet is. $cell_beneath=-1$ als $x_1 = n$, anders $cell_beneath=s(c_{x_1+1,x_2})$.

Aangenomen wordt dat voetgangers maximaal l cellen vooruit kunnen kijken. Hierdoor worden $gap(p)$, $gap_{opp}(p,1)$ en $gap_{opp}(p,-1)$ begrensd door l . In [2] stellen Blue & Adler l gelijk aan 2 keer de maximumsnelheid. Omdat ze hiervoor geen verklaring voor geven neem ik aan dat l elk willekeurig geheel getal kan zijn.

Ook wordt er aangenomen dat voetgangers alleen zullen inhalen als ze iemand voor zich zien lopen (regel 1). Indien ze iemand voor zich zien lopen zullen ze kijken of ze van rij kunnen veranderen. Een voetganger p kan alleen naar rij $x_1 - 1$ ($x_1 + 1$) gaan als cel c_{x_1-1,x_2} (c_{x_1+1,x_2}) tot de loopruimte behoort en vrij is. In dat geval zal de voetganger kijken of de situatie in de naast gelegen rij $x_1 - 1$ ($x_1 + 1$) beter is dan in zijn huidige rij x_1 . Met beter wordt bedoeld dat de gap in die naast gelegen rij groter is dan $gap(p)$ in zijn huidige rij. De voetganger gaat uiteindelijk naar die rij waarvoor de gap het grootst is. Indien twee naast gelegen rijen $x_1 - 1$ en $x_1 + 1$ dezelfde maximale gap hebben, wordt *random* een keuze gemaakt. Hieronder worden staan de drie regels.

Regel 1: kijk of voetganger p een andere voetganger voor zich ziet lopen

Als $gap(p) < l$

En $x_2 + gap(p) + 1 \leq m$

Dan ga naar regel 2,

Anders blijft voetganger p in dezelfde rij x_1 lopen.

Regel 2: controleer of de cel precies boven (onder) cel c_{x_1, x_2} leeg is

Als cel c_{x_1-1, x_2} niet tot de loopruimte hoort,

Dan $cell_above = -1$,

Anders $cell_above = s(c_{x_1-1, x_2})$.

Als cel c_{x_1+1, x_2} niet tot de loopruimte hoort,

Dan $cell_beneath = -1$,

Anders $cell_beneath = s(c_{x_1+1, x_2})$.

Ga naar regel 3.

Regel 3: bepaal in welke rij de voetganger zal gaan lopen

Als $cell_above = 0$

Dan $gap1 = gapp_{opp}(p, -1)$

Anders $gap1 = -1$

$gap2 = gap(p)$

Als $cell_beneath = 0$

Dan $gap3 = gapp_{opp}(p, 1)$

Anders $gap3 = -1$

Als $\max(gap1, gap2, gap3) = gap2$

Dan blijft de voetganger in zijn huidige rij lopen

Anders

Als $\max(gap1, gap2, gap3) = gap1$

Dan

Als $gap1 = gap3$

Dan $x_1 = x_1 + b$, $b \sim \text{bernoulli}(\text{kans} = 0.50, -1, 1)$

Anders $x_1 = x_1 - 1$

Anders $x_1 = x_1 + 1$

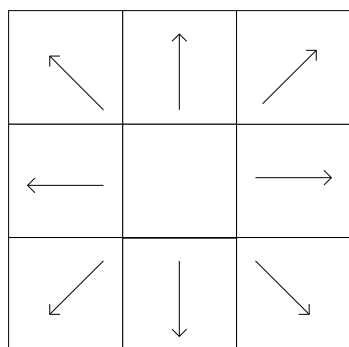
Het bepalen van de loopsnelheid

De snelheid v_p van een voetganger p wordt als volgt bepaald (regel 4):

$$\begin{array}{ll} v_p = \min(v_p + 1, v_{\max}) & \text{als } \mathit{gap}(p) \geq v_p + 1, \\ v_p = \mathit{gap}(p) & \text{anders.} \end{array}$$

6.3 Algemene modelformulering van eenrichtingsverkeer

In de vorige twee paragrafen werd aangenomen dat de voetgangers van links naar rechts liepen. In de praktijk hebben voetgangers in tegenstelling tot auto's een grote bewegingsvrijheid. Om dat zoveel mogelijk te handhaven wordt aangenomen dat voetgangers acht verschillende looprichtingen op kunnen lopen. In onderstaand figuur wordt voor een persoon die in cel $c_{2,2}$ staat de acht verschillende looprichtingen die hij op kan lopen, geïllustreerd.



Figuur 3: illustratie van de acht verschillende looprichtingen

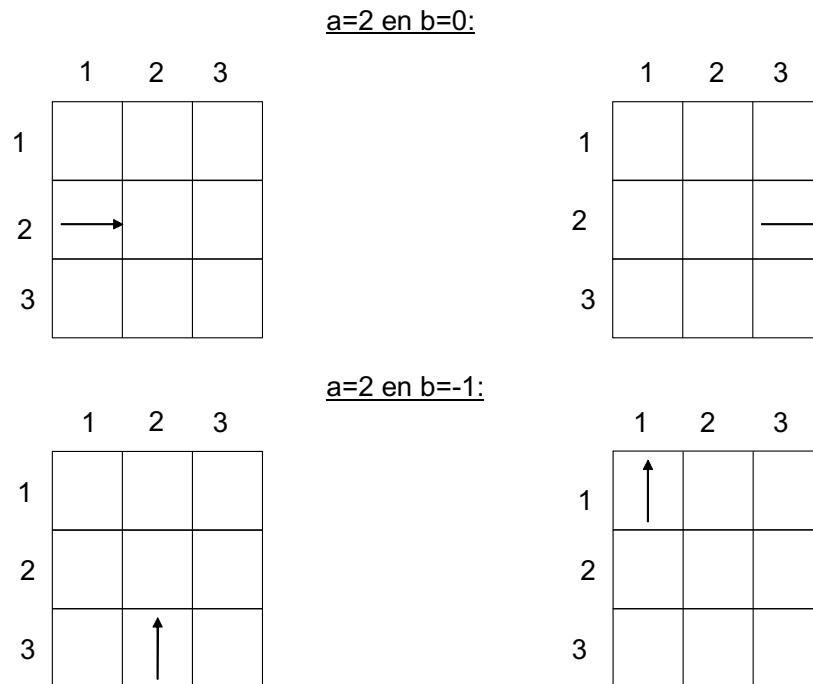
In tegenstelling tot de beschrijving in de vorige paragraaf lopen de voetgangers óf allemaal in noordelijke óf allemaal in noordoostelijke óf allemaal in een van de andere zes richtingen. Dit betekent dat de betekenis van de gebruikte variabelen zoals in de vorige paragraaf is gedefinieerd niet meer volstaat en daarom worden de volgende nieuwe variabelen geïntroduceerd om een bepaalde cel aan te duiden:

a : het aantal cellen waarmee een voetganger recht vooruit gaat,

b : het aantal cellen waarmee een voetganger opzij gaat. b is positief (negatief) als een voetganger naar rechts (links) stapt,

$L(a,b)$: de cel $c_{i,j}$ waarin een voetganger terecht komt na het maken van a voorwaartse en b zijwaartse stappen.

In onderstaand figuur wordt de betekenis van de twee variabelen geïllustreerd aan de hand van twee voorbeelden. De pijlen representeren de looprichting van een voetganger. In het eerste voorbeeld beweegt een voetganger die in cel $c_{2,1}$ staat twee cellen vooruit waardoor hij in cel $c_{2,3}$ komt te staan. In het andere voorbeeld beweegt een voetganger twee cellen vooruit en een cel naar links.



Figuur 4: illustratie van de nieuwe variabelen a en b

Verklaring variabelen:

- $gap(p)$: het aantal lege cellen voor voetganger p ,
- $gap_{opp}(p,1)$: het aantal lege cellen voor voetganger p als hij in cel $L(0,1)$ zou staan,
- $gap_{opp}(p,-1)$: het aantal lege cellen voor voetganger p als hij in cel $L(0,-1)$ zou staan,
- $cell_left$: indicatie of cel $L(0,-1)$ tot de loopruimte hoort en vrij of bezet is. $cell_left=-1$ als de cel niet tot de loopruimte hoort en anders is $cell_left$ gelijk aan de toestand van cel $L(0,-1)$.
- $cell_right$: indicatie of cel $L(0,1)$ tot de loopruimte hoort en vrij of bezet is. $cell_right=-1$ als de cel niet tot de loopruimte hoort, anders is $cell_left$ gelijk aan de toestand van cel $L(0,1)$.

Regel 1: kijk of voetganger p een andere voetganger voor zich ziet lopen

Als $gap(p) < l$

En cel $L(gap + 1,0)$ behoort tot de loopruimte

Dan ga naar regel 2,

Anders blijft voetganger p in dezelfde rij lopen.

Regel 2: controleer of direct naast gelegen cellen leeg zijn

Als cel $L(0,-1)$ niet tot de loopruimte hoort,
Dan $cell_left=-1$,
Anders $cell_left=s(L(0,-1))$.

Als cel $L(0,1)$ niet tot de loopruimte hoort,
Dan $cell_right=-1$,
Anders $cell_right=s(L(0,1))$.

Ga naar regel 3.

Regel 3: bepaal of de voetganger opzij (links of rechts) zal stappen

Als $cell_left=0$
Dan $gap1=gap_{opp}(p,-1)$
Anders $gap1=-1$

$gap2=gap(p)$

Als $cell_right=0$
Dan $gap3=gap_{opp}(p,1)$
Anders $gap3=-1$

Als $\max(gap1,gap2,gap3)=gap2$
Dan blijft de voetganger in zijn huidige rij lopen
Anders

Als $\max(gap1,gap2,gap3)=gap1$
Dan

Als $gap1=gap3$

Dan stapt de voetganger

Of naar de linker naastgelegen cel met kans 0.5

Of anders naar de rechter naastgelegen cel.

Anders stapt de voetganger naar de linker naastgelegen cel $L(0,-1)$

Anders stapt de voetganger naar de rechter naastgelegen cel $L(0,1)$

Regel 4: bepaal de snelheid van de voetganger

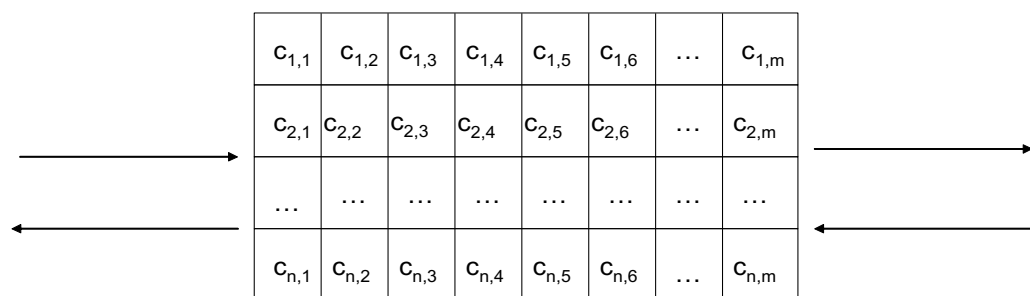
Als $gap(p) \geq v_p + 1$

Dan $v_p = \min(v_p + 1, v_{\max})$

Anders $v_p = gap(p)$

6.4 Het simuleren van tweerichtingsverkeer

In deze paragraaf wordt het model dat in paragraaf 6.3 wordt beschreven uitgebreid. In tegenstelling tot het model in de vorige paragraaf kunnen voetgangers nu twee richtingen op lopen.



Figuur 5: een voorbeeld van een tweerichtingsweg

Vanwege de twee verschillende looprichtingen wordt gebruik gemaakt van een nieuwe variabele $space(p)$ die gezien kan worden als de hoeveelheid vrije ruimte die voetganger p voor zich heeft. De waarde van $space(p)$ hangt af van het feit of voetganger p een andere voetganger w ziet en van de looprichting d_w van die voetganger w (mits die gezien wordt). $Space(p)$ wordt als volgt bepaald:

Als voetganger p een andere voetganger w ziet

Dan

$$\text{Als } d_p \neq d_w$$

$$\text{Dan } space(p) = \lfloor 0.5 * gap(p) \rfloor$$

$$\text{Anders } space(p) = gap(p)$$

Anders $space(p) = gap(p)$.

$gap(p)$ heeft nog steeds dezelfde betekenis: het aantal lege cellen voor voetganger p .

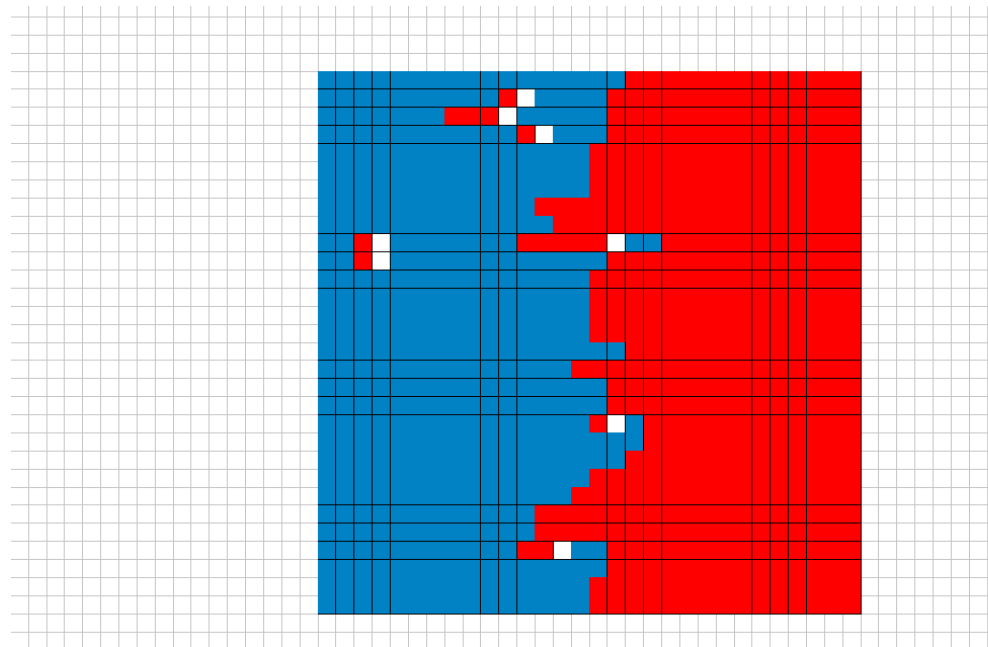
Dus als een voetganger geen andere voetganger voor zich ziet lopen is $space(p)$ gelijk aan $gap(p)$. Indien hij een andere voetganger ziet lopen die dezelfde looprichting heeft zal $space(p)$ ook gelijk zijn aan $gap(p)$. Als een voetganger p een andere voetganger w met tegengestelde looprichting ziet gaat hij zich anders gedragen; zijn snelheid zal met de helft afnemen.

Verder wordt gebruik gemaakt van dezelfde regels (op regel 3 en 4 na) die in de vorige paragraaf staan beschreven. In regel 3 worden $gap(p)$, $gapp_{opp}(p,-1)$ en $gapp_{opp}(p,1)$ vervangen door respectievelijk $space(p)$, $space_{opp}(p,-1)$ en $space_{opp}(p,1)$.

Ook de snelheid v_p van een voetganger p hangt af van $space(p)$. Als een voetganger genoeg ruimte voor zich heeft zal zijn loopsnelheid met een toenemen, mits hij zijn

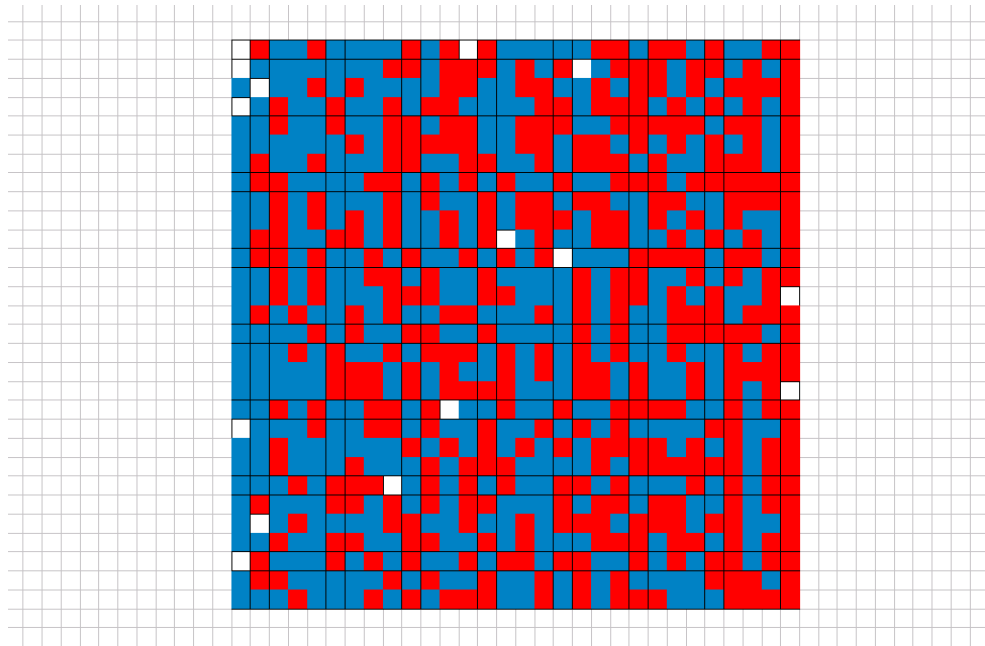
maximumsnelheid nog niet heeft bereikt. Anders wordt zijn loopsnelheid gelijk aan $space(p)$.

Omdat voetgangers twee richtingen op kunnen lopen, kan het voor komen dat twee tegemoet komende voetgangers beide even stil moeten staan omdat ze elkaar wegens drukte niet kunnen passeren. Op lange termijn leidt dit tot het vastlopen van het systeem; bij grote drukte kan niemand meer verder lopen ($v_p = 0$), waardoor de toestand van het systeem niet meer verandert. Het vastlopen van het systeem wordt ook wel *deadlocking* genoemd. In onderstaand figuur wordt een voorbeeld van een zogenoemde *deadlock* situatie gegeven. Voetgangers die van rechts naar links lopen worden met de kleur rood aangeduid en voetganger die van links naar rechts lopen worden met blauw aangeduid. In de witte cellen staan geen voetgangers.



Figuur 6: voorbeeld van een deadlock situatie

Om zogenaamde *deadlocks* te voorkomen wordt er een extra regel (regel 5) toegevoegd. Indien twee voetgangers p en w met tegengestelde looprichting dicht op elkaar staan, zullen beide voetgangers óf van plaats verwisselen met een bepaalde kans p_{exchg} óf ze zullen beide even stil blijven staan met kans $(1 - p_{exchg})$ [1]. In werkelijkheid wringen voetgangers zich namelijk ook bij grote drukte door de menigte waardoor ze toch wat vooruit komen. Zie bijlage B voor een illustratie van de verwisselingregel. Met behulp van simulatie is aangetoond dat met de verwisselingregel er geen *deadlocks* zullen ontstaan. In onderstaand figuur wordt een situatie na 8 uur getoond. Tijdens de simulatie was p_{exchg} gelijk aan 0.5.



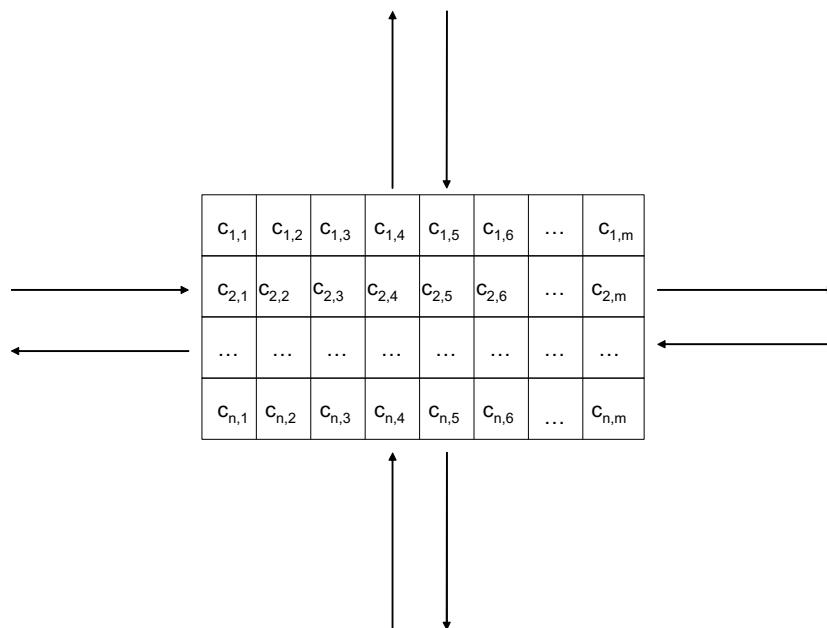
Figuur 7: een situatie na het gebruik van de verwisselregel

In bijlage C is de nieuwe set regels voor het modelleren van tweerichtingsverkeer opgenomen.

6.5 Een 4-stromen voetgangersmodel

In deze paragraaf ga ik nog een stap verder. Voetgangers kunnen nu vier verschillende richtingen op lopen:

- van west naar oost en omgekeerd,
- en van noord naar zuid en omgekeerd.



Figuur 8: een loopruimte met vier verschillende loopstromen

In dit model wordt gebruik gemaakt van dezelfde regels die gebruikt worden voor tweerichtingsverkeer. Omdat personen vier richtingen op kunnen lopen, kunnen er twee type conflicten plaatsvinden:

- een conflict tussen voetgangers met tegengestelde looprichting,
- en een conflict tussen kruisende voetgangers.

Om ervoor te zorgen dat die conflicten niet tot *deadlocks* zullen leiden worden er twee extra regels aan de bestaande set regels toegevoegd [3]. Die regels zorgen ervoor dat de bij het conflict betrokken voetgangers van positie zullen verwisselen indien voor beide voetgangers $v_p = space(p) = 0$ geldt. Blue & Adler nemen aan dat een voetganger per tijdstap hoogstens een keer zo'n verwisseling kan ondergaan. De regels voor de verwisselingen worden voor een voetganger p pas nadat zijn snelheid v_p is bepaald uitgevoerd.

De volgende typen verwisselingen worden onderscheiden [3]:

- *direct exchange*: twee voetgangers met tegengestelde richting looprichting veranderen van positie. Dit type verwisseling zagen we ook bij tweerichtingsverkeer.
- *diagonal exchange*: twee voetgangers, die diagonaal ten opzichte van elkaar staan, veranderen van positie.
- *lateral exchange*: twee voetgangers die naast elkaar staan en kruisende looprichtingen hebben, veranderen van positie.

Hieronder worden de regels voor de diagonale en zijwaartse verwisselingen beschreven.

Regel 6: diagonale verwisseling

Als $space(p)=0$

En cel $L(1,\pm 1)$ wordt bezet behouden door een kruisende voetganger w

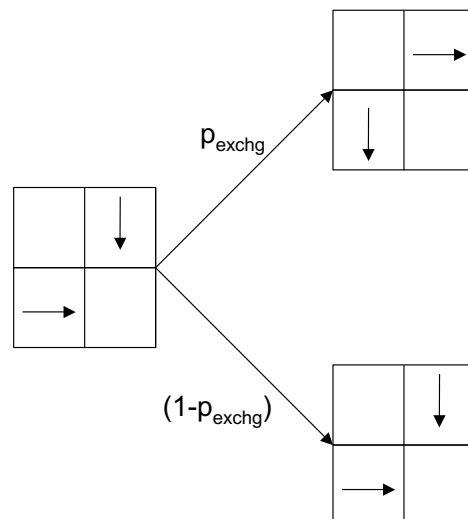
Dan

Of de voetgangers verwisselen van positie met kans p_{exchg}

en $v_p = 1$

Of de voetgangers blijven even staan met kans $(1 - p_{exchg})$.

In onderstaand figuur wordt de verwisseling nog eens geïllustreerd.



Figuur 9: voorbeeld van een diagonale verwisseling

Regel 7: zijwaartse verwisseling

Als $space(p)=0$

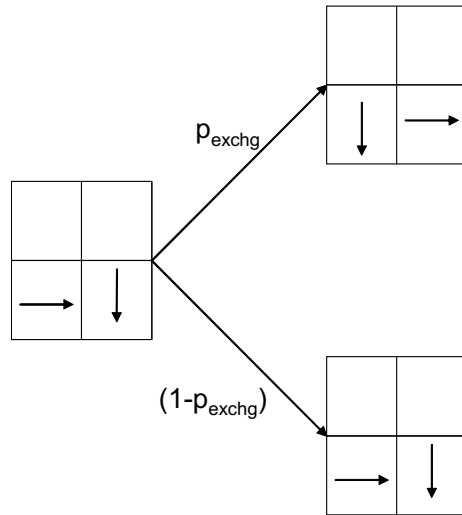
En cel $L(1,0)$ wordt bezet behouden door een kruisende voetganger w

Dan

Of de voetgangers verwisselen van positie met kans p_{exchg}

en $v_p = 1$

Of de voetgangers blijven even staan met kans $(1 - p_{exchg})$.



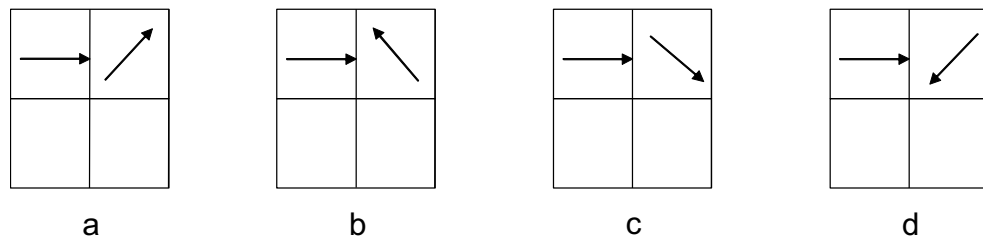
Figuur 10: voorbeeld van een zijwaartse verwisseling

6.6 Een voetgangersmodel met acht richtingen

De belangrijkste eigenschappen van het model dat tot nu toe beschreven is kunnen als volgt kort samengevat worden:

- voetgangers observeren beschikbare ruimte in de nabije omgeving,
- voetgangers proberen zich zoveel mogelijk vooruit te bewegen met een gewenste maximumsnelheid indien dat mogelijk is,
- voetgangers doen een stap opzij indien zij een andere voetganger voor hen zien die hen de weg belemmerd,
- een tweetal voetgangers verandert indien dat nodig is met een bepaalde kans van positie om deadlocking te voorkomen.

Om een wat meer realistisch model te krijgen wordt aangenomen dat voetgangers nu alle acht verschillende richtingen op kunnen lopen. Ik heb geen literatuur kunnen vinden die zo'n model bereikt. Blue & Adler bijvoorbeeld, gaan niet verder dan het beschrijven van een voetgangersmodel waarin voetgangers vier richtingen op kunnen. Wat vast staat is dat het model nu complexer wordt en andere type conflicten kunnen ontstaan, namelijk een conflict tussen een rechtdoorgaande voetganger en een andere voetganger w met een diagonale looprichting. In onderstaand figuur worden voorbeelden gegeven.



Figuur 11: illustratie van nieuwe conflicten die kunnen ontstaan

Ook in dit type model zullen twee voetgangers met een bepaalde kans van plaats verwisselen om een mogelijke *deadlock* te vermijden. Zelf denk ik dat de voorbeelden a en c in bovenstaand figuur niet tot problemen zullen leiden omdat in die gevallen beide voetgangers in oostelijke richting lopen en daarom zal alleen in de voorbeelden b en d een verwisseling plaats mogen vinden.

Het model wordt verder uitgebreid door aan te nemen dat:

- obstakels in de loopruimte aanwezig kunnen zijn, wat betekent dat voetgangers in staat zijn om die obstakels te vermijden,
- voetgangers per tijdstap van looprichting kunnen veranderen,
- voetgangers een bepaalde bestemming hebben waar ze naar toe lopen.

Verder wordt aangenomen dat voetgangers de kortste route naar hun eindbestemming proberen te nemen. Voetgangers zullen dan ook altijd in die richting lopen die leidt tot de kortste route naar zijn eindbestemming. Omdat de loopruimte obstakels kan

bevatten is de toestand van een cel $c_{i,j}$ nu gelijk aan één in een van de volgende gevallen:

- een cel wordt bezet gehouden door een voetganger,
- er is een obstakel in die cel gelegen.

De looprichting van voetgangers wordt bepaald door een algoritme genaamd A* (uitspraak: A-star). Gegeven de positie x_p van een voetganger p bepaalt het algoritme de kortste route naar zijn eindbestemming, rekeninghoudend met de aanwezigheid van obstakels. Het A* algoritme wordt in de volgende paragraaf besproken.

Aan het begin van elke update wordt eerst de looprichting d_p van een voetganger p bepaald en vervolgens wordt de al eerder beschreven set regels geëvalueerd.

6.7 Het A* algoritme

A* is een heuristisch algoritme dat vaak wordt gebruikt voor computerspellen [11]. Net als bij een cellulaire automaten model wordt aangenomen dat de ruimte onderverdeeld is in even grote vierkante cellen. Het algoritme bepaalt de kortste route vanuit een cel $c_{e,f}$ naar een andere cel $c_{k,o}$, rekeninghoudend met aanwezige obstakels. Met dit laatste wordt bedoeld dat de gevonden route niet door obstakels zal lopen. Het algoritme gaat ervan uit dat voetgangers acht verschillende richtingen op kunnen lopen.

Elke cel $c_{i,j}$ heeft een label $(G, H, F, Parent)$ waarbij:

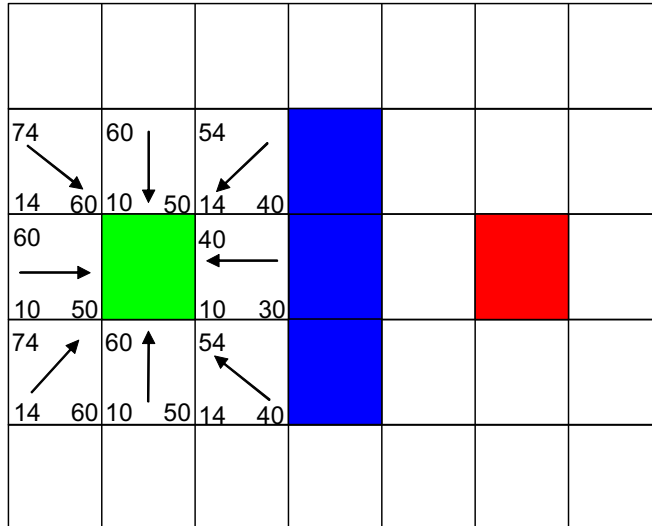
- G de afstand is van beginpunt $c_{e,f}$ naar cel $c_{i,j}$ (via de kortste route),
- H een schatting is van de afstand van cel $c_{i,j}$ naar eindbestemming $c_{r,s}$,
- F een schatting is van de afstand van beginpunt $c_{e,f}$ naar eindbestemming $c_{r,s}$ via cel $c_{i,j}$: $F=G+H$,
- $Parent$ aangeeft wat de voorganger van cel $c_{i,j}$ is in de kortste route van cel $c_{e,f}$ naar cel $c_{i,j}$.

De afstanden waar hierboven over gesproken wordt zijn niet de werkelijke afstanden tussen twee cellen. Aangenomen wordt dat rechte bewegingen een afstand hebben van 10 en diagonale bewegingen een afstand van 14 (af te leiden met de Stelling van Pythagoras) hebben.

Vaak wordt er voor het berekenen van H gekozen voor de “Manhattan” schatting. Deze schatting schat de af te leggen afstand op basis van de sommatie van het verschil tussen de rij- en kolomnummers van de cellen. Deze “Manhattan” schatting houdt geen rekening met muren en negeert diagonale bewegingen, het is immers maar een schatting. Deze schatting maakt het algoritme heuristisch.

In onderstaand figuur wordt een voorbeeld gegeven van een loopruimte waarin een route gezocht wordt van de groene cel naar de rode cel. Tussen de twee cellen bevindt zich een blauwe muur waar voetgangers omheen moeten lopen. Zoals je kunt zien

staan in de cellen getallen. Linksboven staat de afstand F , linksonder staat de afstand G vanuit het beginpunt en rechtsonder wordt de geschatte af te leggen afstand tot het eindpunt weergegeven.



Figuur 12: uitleg van de gebruikte labels in A* algoritme

Alvorens het algoritme te bespreken worden eerst een paar termen toegelicht:

- *Current*: de cel die als uitgangspunt fungeert. In bovenstaand figuur is het beginpunt de *Current*.
- *OpenList*: een lijst van cellen die nog bezocht kunnen worden.
- *ClosedList*: een lijst van cellen die al bezocht zijn en waar niet meer naar gekeken hoeft te worden omdat aangenomen wordt dat een cel maar een keer bezocht kan worden.

Algoritme

Stap 1 (initialisatie):

Maak de *OpenList* en de *ClosedList* leeg. Voeg vervolgens het beginpunt $c_{e,f}$ toe aan de *OpenList*.

Stap 2:

Zoek in de *OpenList* de cel met de laagste F-waarde. Maak de *Current* gelijk aan deze cel. Verwijder deze cel uit de *OpenList* en voeg het toe aan de *ClosedList*.

Stap 3:

Onderzoek elk van de acht direct omliggende cellen van de *Current* en negeer de cel als het óf in de *ClosedList* zit óf al in de *OpenList* zit óf niet begaanbaar is. Anders, als

de cel nog niet in de *OpenList* zit voeg dan de cel toe aan de *OpenList*, bereken de afstanden G , H en F , en maak de *Parent* van die cel gelijk aan de *Current*.

Als de cel al in de *OpenList* zit, kijk dan of de afstand via de *Current* korter is dan de opgeslagen afstand. Dit kan gedaan worden door te kijken naar de G -waarde van die cel. Als de route via de *Current* naar deze cel in een lagere G -waarde voor die cel resulteert, verander dan de G - en de F -waarde van de cel. Maak de *Parent* van die cel gelijk aan de *Current*.

Stap 4:

Stop het algoritme als een van de volgende situaties zich heeft voorgedaan:

- de eindbestemming is toegevoegd aan de *OpenList* (er is een route gevonden),
- de *OpenList* is leeg (er is geen route gevonden).

Anders ga naar stap 2.

In het A* algoritme wordt dus aangenomen dat een route gevonden is zodra de eindbestemming aan de *OpenList* is toegevoegd.

Bewijs:

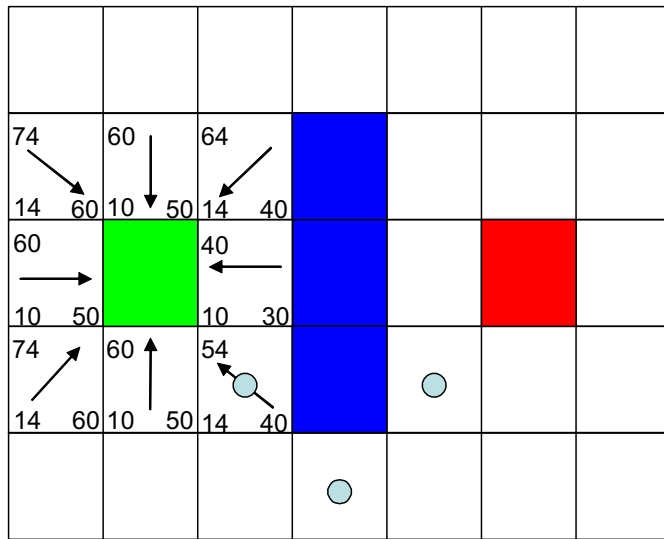
Aangenomen wordt dat $H=0$ en dat de *Current* een buur is van de eindbestemming $c_{k,o}$. De directe afstand d van een cel naar één van zijn direct omliggende burens is óf 10 óf 14. De afstand van de *Current* naar eindbestemming $c_{k,o}$ kan als volgt gedefinieerd worden: $d(\text{Current}, c_{k,o}) = d(\text{Current}, \text{buur}) + d(\text{buur}, c_{k,o})$.

Er geldt dus dat:

- $d(\text{Current}, c_{k,o}) = d(\text{Current}, \text{buur}) \in \{10, 14\}$ als $\text{buur} = c_{k,o}$,
- $d(\text{Current}, c_{k,o}) = d(\text{Current}, \text{buur}) + d(\text{buur}, c_{k,o})$ anders.

Omdat de afstand tussen twee verschillende cellen altijd minstens tien is kan geconcludeerd worden dat een route via één van de andere burens (ongelijk aan de eindbestemming) altijd tot een langere afstand zal leiden.

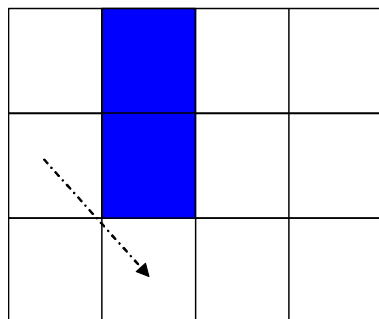
In onderstaand figuur wordt een mogelijke oplossing gegeven van het in het vorige figuur geschetste probleem.



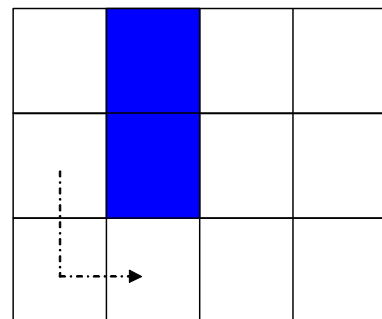
Figuur 13: mogelijke route vanuit cel $C_{3,2}$ naar cel $C_{3,6}$

Aanpassing van het algoritme

Ik heb het A* algoritme geïmplementeerd en wat aangepast om het bruikbaar te maken voor de simulatie van voetgangersstromen. Het algoritme is op zo'n manier aangepast dat voetgangers geen hoeken snijden, maar dat ze netjes om een hoek heen lopen. Zie onderstaand figuur ter illustratie. In dat blauwe hok staat een obstakel.



Origineel algoritme



Aangepast algoritme

Figuur 14: illustratie aanpassing van het A* algoritme

6.7.1 A* versus het algoritme van Dijkstra

Een ander vaak gebruikte algoritme voor het vinden van kortste paden is het Dijkstra algoritme. Alvorens een vergelijking te maken tussen dat algoritme en het A* algoritme wordt het Dijkstra algoritme kort besproken.

Het Dijkstra algoritme

Met het Dijkstra algoritme [18] kan in een netwerk van knooppunten het kortste pad van een gegeven knooppunt naar een ander knooppunt bepaald worden, gelijktijdig wordt het kortste pad gevonden van dat beginknooppunt naar alle andere knooppunten. De lengte van een pijl (N_i, N_j) die twee knooppunten N_i en N_j met elkaar verbindt is gelijk aan de afstand tussen die twee punten en wordt weergegeven met c_{ij} .

Het Dijkstra algoritme maakt gebruik van een labelprocedure. Elk knooppunt N_i heeft een label (α_i, β_i) , waarbij α_i de schatting is voor de lengte van een kortste pad van startpunt N_s naar N_i en β_i geeft aan wat de voorganger is van knooppunt N_i in het huidige beste pad van startpunt N_s naar N_i .

Hieronder wordt het algoritme gegeven voor het berekenen van het kortste pad van N_s naar een of meerdere andere knooppunten.

Stap 1 (initialisatie):

Label elk knooppunt N_i met (α_i, β_i) , waarbij:

$\alpha_i = 0$ als $i = s$;

$\alpha_i = \infty$ als $i \neq s$;

$\beta_i = N_s$.

Merk het label van knooppunt N_s als permanent en merk de andere labels als tijdelijk. Laat $p := s$.

Stap 2:

Pas voor elk tijdelijk gelabeld knooppunt N_i waarvoor de pijl (N_p, N_i) bestaat het label (α_i, β_i) aan volgens:

$\alpha_i = \min\{\alpha_i, \alpha_p + c_{pi}\}$

$\beta_i = N_s$ als $\alpha_p + c_{pi} < \alpha_i$

$\beta_i = \beta_i$ anders

Stap 3:

Zoek onder de tijdelijk gelabelde knooppunten N_i het knooppunt N_k waarvoor $\alpha_k = \min(\alpha_i)$. Merk het label van knooppunt N_k als permanent en laat $p := k$.

Stap 4:

Stop het algoritme als alle labels permanent zijn; ga anders terug naar stap 2.

Vergelijking tussen de twee kortste pad algoritmes

Het grootste verschil tussen het Dijkstra algoritme en het A* algoritme is dat het Dijkstra algoritme geen gebruik maakt van een heuristiek. Dat wil zeggen dat de bij A* gebruikte H-waarde in het Dijkstra algoritme gelijk is aan nul. Door gebruik te maken van de geschatte afstand H zoekt A* veel gericht in de richting van het eindpunt. Omdat het Dijkstra algoritme geen gebruik maakt van deze schatting zal het er veel langer over doen voordat het een kortste route heeft gevonden.

Een ander verschil tussen de twee algoritmes is dat bij Dijkstra de kortste route tussen een gegeven beginpunt en elk ander punt wordt gezocht, terwijl bij A* de kortste route tussen twee gegeven cellen wordt bepaald. Het A* algoritme stopt namelijk zodra het eindpunt aan de *OpenList* is toegevoegd. In Tabel 1 worden de verschillen nog eens uiteengezet.

Dijkstra	A*
Knooppunten	Cellen
kortste route tussen een gegeven punt en elk ander punt	kortste route tussen twee gegeven cellen
Geen	geschatte afstand (H) tot eindbestemming

Tabel 1: overeenkomsten tussen Dijkstra algoritme en A* algoritme

Wat betreft de overeenkomsten, komen de tijdelijk gelabelde knooppunten bij Dijkstra overeen met de cellen die bij A* in de lijst *OpenList* zitten. En de permanent gelabelde knooppunten bij Dijkstra komen overeen met de cellen die bij A* in de *ClosedList* zitten. Net als bij Dijkstra wordt er bij A* niet meer naar de cellen in de *ClosedList* gekeken omdat de kortste route naar die cellen al gevonden is.

Dijkstra	A*
Tijdelijk gelabelde knooppunten	cellen in de lijst <i>OpenList</i>
permanent gelabelde knooppunten	cellen in de lijst <i>ClosedList</i>

Tabel 2: verschillen tussen Dijkstra en A*

► 7 CONCEPT VOETGANGERSSIMULATIE

Tijdens de eerste fase van de stage is gebleken dat er binnen Incontrol geen document beschikbaar was waarin het algemeen concept voor voetgangerssimulatie wordt beschreven. Alvorens verder te kunnen gaan met het ontwerp van de simulatiebibliotheek vond ik het noodzakelijk om eerst dat concept op papier te zetten omdat het juist de bedoeling is dat de bibliotheek gebruikt zal worden om het concept naar een simulatiemodel te vertalen.

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van dat concept. Om de invloed van processen op voetgangersgedrag in voldoende mate mee te nemen, omvat het ontwikkelde concept niet alleen het loopgedrag, maar ook andere aspecten van voetgangersgedrag, zoals het routekeuzegedrag en het uitvoeren van activiteiten.

Aangenomen wordt dat het te simuleren systeem verdeeld is in de volgende type gebieden:

- **loopgebieden:** gebieden waarin personen alléén lopen en géén activiteiten uitvoeren,
- **functionele gebieden:** gebieden waarin personen een activiteit kunnen uitvoeren en niet lopen.

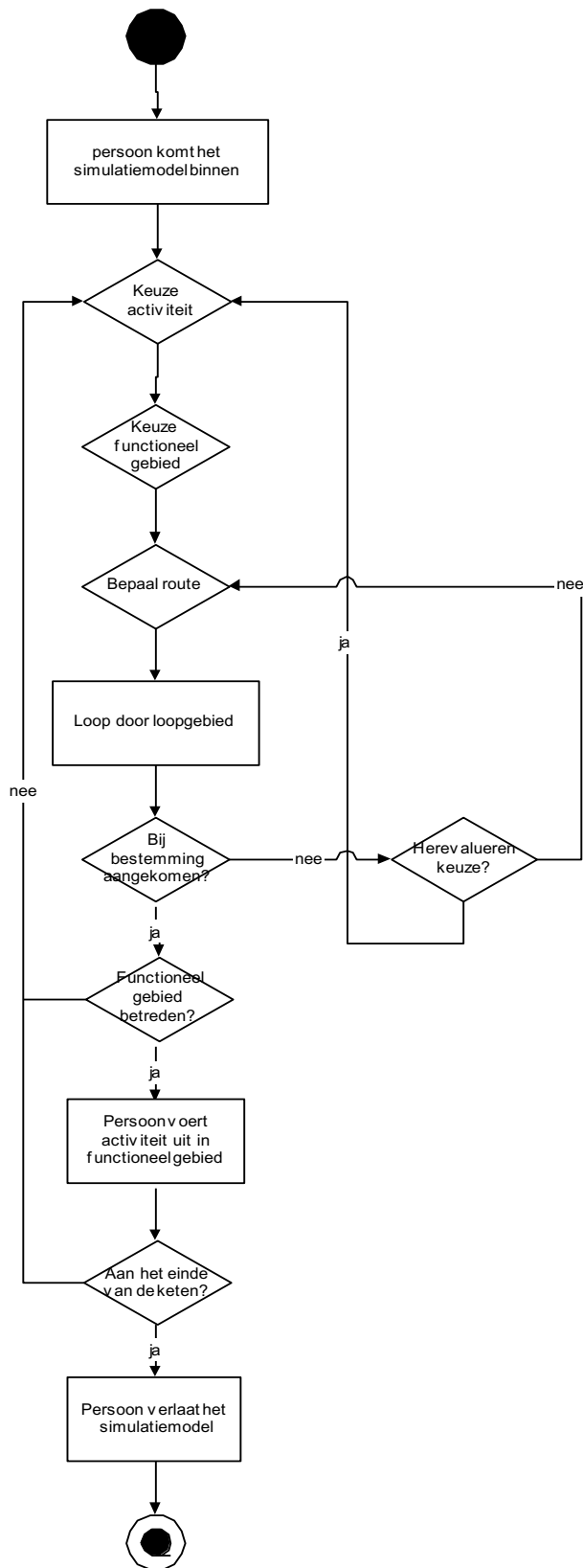
Om enige structuur in voetgangersgedrag aan te brengen wordt dat gedrag beschreven door het achtereenvolgens maken van een aantal keuzen:

1. het kiezen van een activiteit (activiteitenkeuze),
2. het kiezen van een functioneel gebied om de bij 1. gekozen activiteit uit te voeren (locatiekeuze),
3. het kiezen van een route naar het bij 2. gekozen functioneel gebied (routekeuze).

Na de bovengenoemde keuzen gemaakt te hebben zullen voetgangers via loopgebieden naar hun gekozen functioneel gebied toe lopen. Tijdens het lopen hebben personen de mogelijkheid om hun keuzen te evalueren. Zo kunnen ze bijvoorbeeld tussentijds besluiten om toch maar niet naar hun bestemming te gaan, of aangekomen bij een functioneel gebied hebben personen de mogelijkheid om te besluiten om dat functionele gebied toch maar niet te betreden.

In Figuur 15 wordt het loopproces nog eens in een flowchart weergegeven. De genoemde keuzes worden op drie momenten gemaakt:

- op het moment dat personen het simulatiemodel binnen komen,
- net nadat personen een loopgebied doorlopen hebben,
- net nadat personen een activiteit uitgevoerd hebben.



Figuur 15: Flowchart van het loopproces

Het kiezen van een activiteit

Een activiteitenset Σ is een set van activiteiten die voetgangers zullen uitvoeren. De activiteiten in Σ kunnen verdeeld worden in twee categorieën: activiteiten die uitgevoerd moeten worden en activiteiten die (vrijwillig) uitgevoerd kunnen worden. Daarnaast zijn er niet-tijdgebonden activiteiten die op elk willekeurig tijdstip uitgevoerd kunnen worden en tijdgebonden activiteiten die alleen voor of na een bepaald tijdstip uitgevoerd kunnen worden. Verder kunnen sommige activiteiten alleen in een bepaalde volgorde uitgevoerd worden. Zo zullen treinreizigers die nog geen treinkaartje hebben eerst er een kopen alvorens ze in de trein stappen.

Een activiteitenschema S_p is een geordende set van activiteiten uit de activiteitenset Σ die door een voetganger p worden uitgevoerd. Zo een activiteitenschema zou dus alle verplichte activiteiten moeten bevatten én het zou aan de voorwaarden voor de volgorde waarin de activiteiten uitgevoerd kunnen worden, moeten voldoen. Indien de activiteitenschema's voor de voetgangers vast staan is er geen sprake van een keuze die voetgangers kunnen maken. Indien de activiteitenschema's niet vast staan, wordt op basis van een overgangsmatrix een keuze gemaakt voor een volgend uit te voeren activiteit. In die overgangsmatrix staat dat de kans dat een voetganger die zojuist activiteit $i \in \Sigma$ heeft uitgevoerd vervolgens een andere activiteit k zal kiezen om uit te voeren.

Het kiezen van een functioneel gebied

Activiteiten $i \in \Sigma$ vinden plaats in daarvoor bestemde functionele gebieden j (ook wel activiteitengebieden genoemd). Aangenomen wordt dat in elk functioneel gebied maar één type activiteit plaatsvindt. Een activiteit i kan in meerdere functionele gebieden j plaatsvinden.

Het kiezen van een route

Voetgangers kiezen een route op basis van de af te leggen afstand naar een functioneel gebied waar ze vervolgens een activiteit zullen uitvoeren. Voetgangers zullen altijd voor de kortste route kiezen.

Uit de literatuurstudie is gebleken dat de keuze voor een route van verschillende route-eigenschappen kan afhangen:

- de tijd die het duurt om naar een functioneel gebied toe te lopen,
- de reeds afgelegde afstand,
- veiligheid,
- comfort,
- aanwezigheid van obstakels,
- het verwachte aantal interacties met andere voetgangers,
- aantrekkelijkheid van de route.

Helaas wordt het precieze verband tussen de keuze voor een bepaalde route en de bovengenoemde route-eigenschappen niet in de literatuur beschreven.

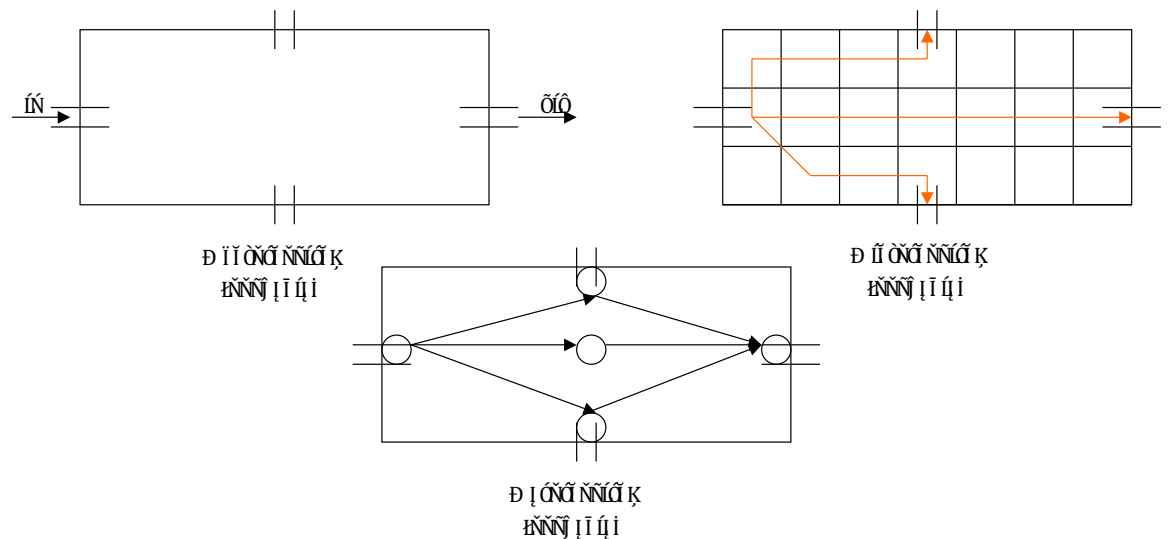
Modellering van de loop- en functionele gebieden

Net als bij voetgangersmodellen kunnen loopgebieden wat betreft de modellering in drie categorieën worden onderverdeeld: macro-, meso- en microscopische loopgebieden.

Bij macroscopische loopgebieden wordt de loopruimte als een soort *black-box* beschouwd; voetgangers treden de loopruimte binnen en verlaten het weer na een bepaalde doorlooptijd. Hoe de voetgangers zich precies door het loopgebied verplaatsen wordt hier niet in acht genomen.

Een mesoscopisch loopgebied wordt gerepresenteerd door een netwerk bestaande uit lijnen en knooppunten. Een lijn (N_i, N_j) verbindt de knooppunten N_i en N_j . Zo'n lijn (N_i, N_j) representeert een pad, met bepaalde lengte $l_{i,j}$, waarover gelopen wordt. In tegenstelling tot macroscopische loopgebieden worden de routes die voetgangers binnen een loopruimte volgen in beschouwing genomen. Tot dusver maakte Incontrol gebruik van deze methode. Het neerleggen van de knooppunten, wat handmatig gebeurt, werd door de geïnterviewde als een tijdrovende zaak gezien; de knooppunten moeten namelijk op zo'n manier worden neergelegd dat de lijnen niet door obstakels heen lopen. Het aantal gebruikte knooppunten (en dus ook het aantal routes) worden daarom zoveel mogelijk beperkt gehouden.

In tegenstelling tot macro- en mesoscopische loopgebieden wordt binnen microscopische loopgebieden het loopgedrag van voetgangers gedetailleerder beschreven. Wat betreft de modellering wordt bij dit type loopgebied gebruik gemaakt van het in hoofdstuk 6 beschreven cellulaire automaten model.

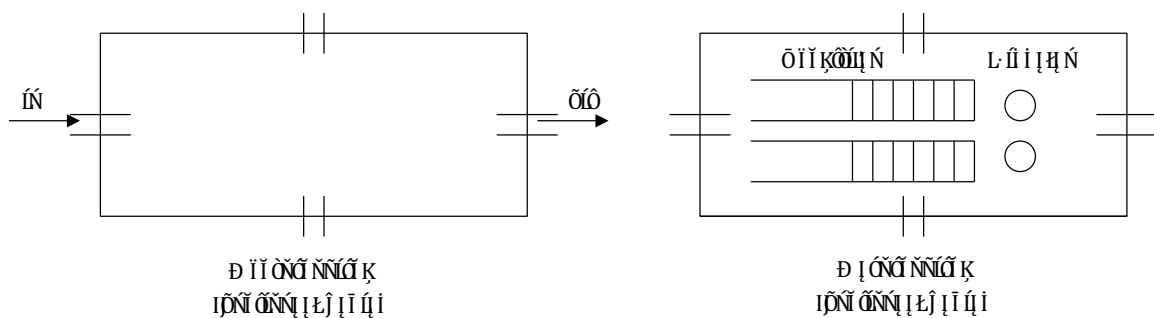


Figuur 16: drie niveau's waarop een gebied gemodelleerd kan worden

De functionele gebieden kunnen in twee categorieën worden ingedeeld, namelijk in macroscopische en mesoscopische gebieden.

Functionele gebieden op macroscopisch niveau worden beschouwd als een soort *black-box*; voetgangers treden het gebied binnen en verlaten het weer na een bepaalde verblijftijd. Het uitvoeren van de activiteiten wordt hier niet in beschouwing genomen.

Bij mesoscopische functionele gebieden worden de activiteiten die voetgangers kunnen uitvoeren juist wel in beschouwing genomen. Zo is het bijvoorbeeld mogelijk dat personen bij binnenkomst in een wachtrij moeten gaan staan omdat alle middelen (zoals balies en machines) om een bepaalde activiteit uit te kunnen voeren bezet zijn.



Figuur 17: twee type functionele gebieden

► 8 CONCLUSIE

Voetgangersgedrag betreft niet alleen het daadwerkelijk loopgedrag van voetgangers. Het betreft ook het kiezen van uit te voeren activiteiten (activiteitenkeuze), het kiezen van een zogenaamde functionele gebieden waar die activiteiten uitgevoerd zullen worden (locatiekeuze) en het kiezen van een route naar de functionele gebieden (routekeuze).

Ondanks dat de bovengenoemde aspecten van voetgangersgedrag in het concept worden meegenomen kan geconcludeerd worden dat er nog een aantal vraagstukken is dat verder uitgewerkt dient te worden. Zo zal bij de activiteitenkeuze verder onderzocht moeten worden hoe voetgangers activiteiten (verplicht/vrijwillig, tijdgebonden/niet-tijdgebonden) kiezen die ze vervolgens uit zullen voeren. Wat betreft de routekeuze is uit de literatuur bekend dat de keuze voor een bepaalde route afhangt van zogenaamde route-eigenschappen. Hoe de samenhang tussen het kiezen van een bepaalde route en die route-eigenschappen precies is wordt in de literatuur niet beschreven.

Wat betreft het loopgedrag is door het ontwikkelen van een microscopisch cellulaire automaten model een eerste stap gezet in de richting van de modellering van microscopisch loopgedrag. Vergeleken met de andere microscopische voetgangersmodellen die in de literatuur worden beschreven is dat model redelijk eenvoudig. Om dat model verder uit kunnen breiden is extra kennis over microscopisch loopgedrag vereist. Uit literatuurstudie is gebleken dat men specifieke kennis over microscopisch voetgangersgedrag mist. Microscopisch voetgangersgedrag is momenteel dan ook voor onderzoekers hét onderwerp van studie.

Aanbeveling:

Om meer inzicht te krijgen in het (microscopisch) voetgangersgedrag raad ik Incontrol aan om óf zelf verder onderzoek te doen óf om gebruik te maken van onderzoeksresultaten die door derden zijn verkregen.

Omdat Incontrol van oorsprong geen onderzoeksinstituut is acht ik de kans op de eerste mogelijkheid niet erg groot.

In Nederland is de sectie Verkeerskunde van Technische Universiteit Delft (Faculteit der Civiele Techniek) druk bezig met onderzoek naar voetgangersgedrag in openbaar vervoervoorzieningen (station, luchthavens en passagiersterminals).

Aanbeveling:

Ga na in hoeverre het mogelijk is gebruik te maken van de door hen opgedane kennis op het gebied van voetgangersstromen.

Wegens een te kort tijdbestek heb ik de simulatiebibliotheek waarmee ik me in eerste instantie zou bezighouden niet meer kunnen ontwerpen en ontwikkelen. Wat betreft de door Incontrol ontwikkelde atomen kan geconcludeerd worden dat een redelijk aantal atomen ontwikkeld is waarmee voetgangersstromen gemodelleerd en gesimuleerd kunnen worden. Het is mij opgevallen dat de tijdens projecten ontwikkelde atomen bij de personen liggen die aan de desbetreffende projecten hebben werkt. Daarnaast zijn sommige atomen en (demo)modellen helemaal niet of

onvolledig gedocumenteerd. Ook heb ik geconstateerd dat de lijst met reeds ontwikkelde atomen speciaal voor voetgangersstromen verouderd is.

Aanbeveling:

Bewaar tijdens projecten ontwikkelde atomen op een plaats die voor alle medewerkers toegankelijk is.

Aanbeveling:

Zorg ervoor dat alle atomen en modellen gedocumenteerd zijn.

Aanbeveling:

Houdt de lijst met reeds ontwikkelde atomen up-to-date.

► **BIJLAGE A: AFLEIDING VAN VERGELIJKING 2**

In paragraaf 2.1.3 wordt voor de doorstromingsgraad q de volgende vergelijking gegeven:

$$q = V * D. \tag{8}$$

Aangenomen wordt dat er sprake is van het volgende lineaire verband tussen de snelheid V en de dichtheid D :

$$V = V_{\max} * \left(1 - \frac{D}{D_{\max}}\right). \tag{9}$$

(9) invullen in (8) levert het volgende op:

$$q = V_{\max} * \left(1 - \frac{D}{D_{\max}}\right) * D. \tag{10}$$

De afgeleide van q naar D is gelijk aan:

$$\frac{dq}{dD} = V_{\max} - 2 * \frac{V_{\max}}{D_{\max}} * D. \tag{11}$$

Door de afgeleide gelijk te stellen aan nul, kan de volgende uitdrukking voor de dichtheid D worden gevonden:

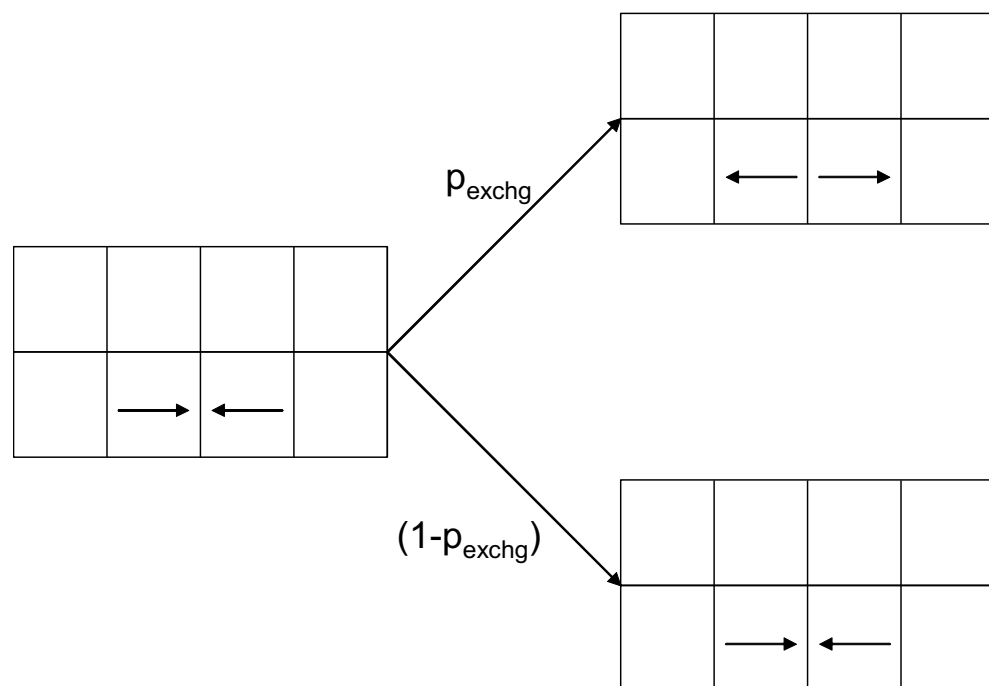
$$D = \frac{D_{\max}}{2}. \tag{12}$$

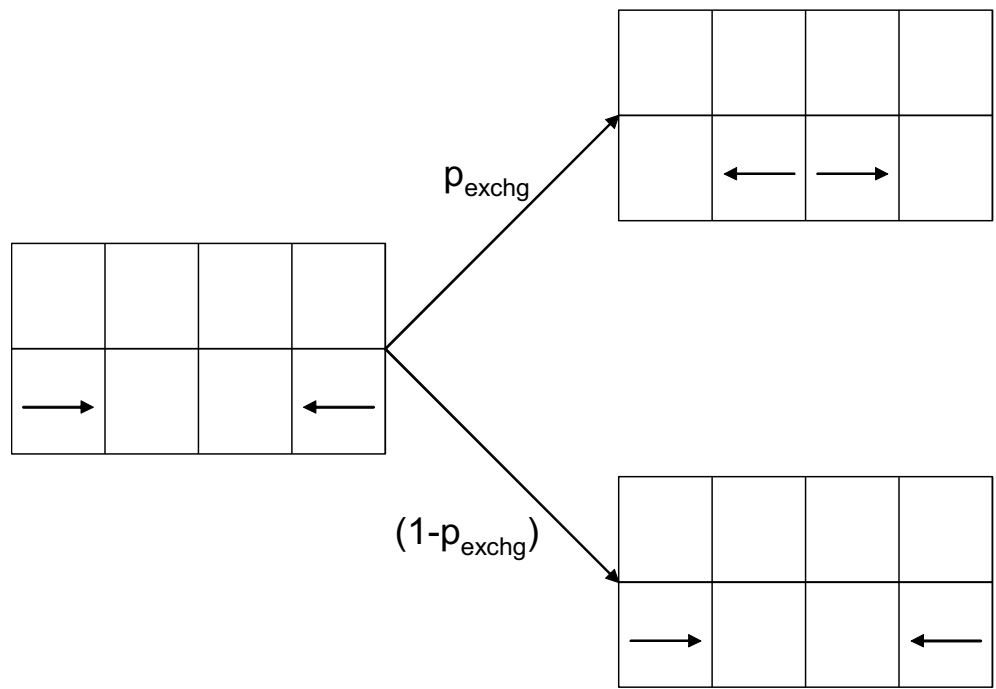
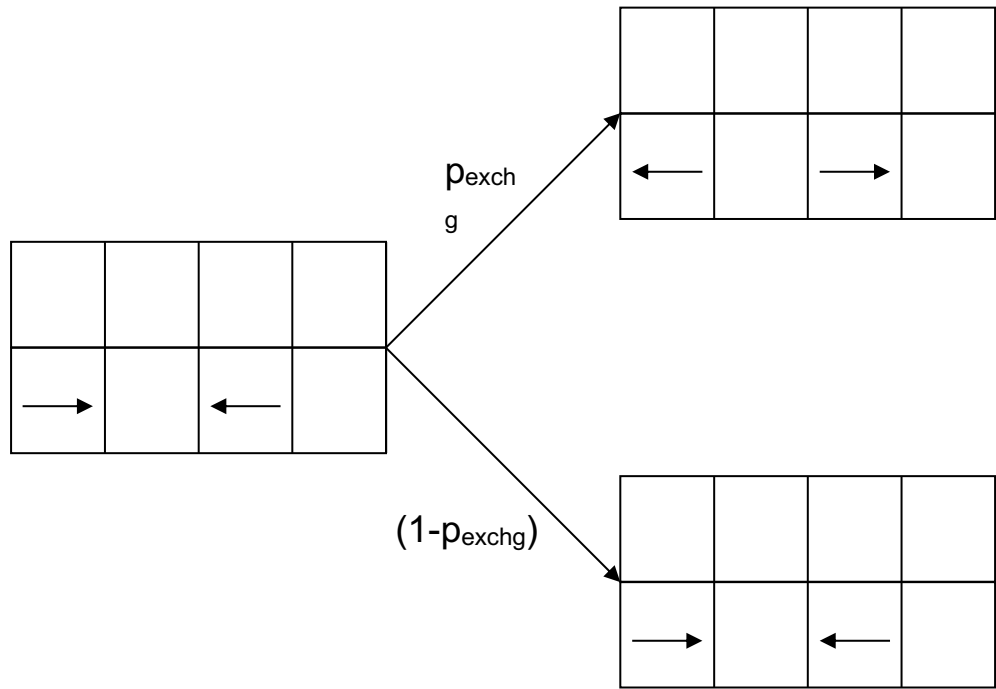
Door vergelijking (12) in vergelijking (10) in te vullen wordt vergelijking (2) verkregen:

$$q_{\max} = \frac{V_{\max} * D_{\max}}{4}.$$

► **BIJLAGE B: ILLUSTRATIE VAN HET VOORKOMEN VAN DOODLOPENDE SITUATIES**

Indien voetgangers twee of meerdere richtingen op kunnen lopen bestaat er kans op doodlopende situaties. Om zogenaamde *deadlocks* te voorkomen zullen twee voetgangers p en w met tegengestelde looprichting en die nul, een of twee lege cellen van elkaar verwijderd zijn, beide óf van plaats verwisselen met kans p_{exchg} óf ze zullen beide even stil blijven staan met kans $(1 - p_{exchg})$. Dit wordt in de onderstaande figuren geïllustreerd. In de figuren worden voetgangers gerepresenteerd door een pijl die hun looprichting aangeeft.





► **BIJLAGE C: REGELS VOOR HET MODELLEREN VAN
TWEERICHTINGSVERKEER**

Regel 1: kijk of voetganger p een andere voetganger voor zich ziet lopen

Als $gap(p) < l$
En cel $L(gap + 1, 0)$ behoort tot de loopruimte
Dan ga naar regel 2,
Anders blijft voetganger p in dezelfde rij lopen.

Regel 2: controleer of direct naast gelegen cellen leeg zijn

Als cel $L(0, -1)$ niet tot de loopruimte hoort,
Dan $cell_left = -1$,
Anders $cell_left = s(L(0, -1))$.

Als cel $L(0, 1)$ niet tot de loopruimte hoort,
Dan $cell_right = -1$,
Anders $cell_right = s(L(0, 1))$.

Ga naar regel 3.

Regel 3: bepaal of de voetganger opzij (links of rechts) zal stappen

Als $cell_left = 0$
Dan $gap1 = space_{opp}(p, -1)$
Anders $gap1 = -1$

$gap2 = space(p)$

Als $cell_right = 0$
Dan $gap3 = space_{opp}(p, 1)$
Anders $gap3 = -1$

Als $\max(gap1, gap2, gap3) = gap2$
Dan blijft de voetganger in zijn huidige rij lopen
Anders

Als $\max(gap1, gap2, gap3) = gap1$
Dan

Als $gap1 = gap3$

Dan stapt de voetganger

Of naar de linker naastgelegen cel met kans 0.5

Of anders naar de rechter naastgelegen cel.

Anders stapt de voetganger naar de linker naastgelegen
cel $L(0, -1)$

Anders stapt de voetganger naar de rechter naastgelegen cel $L(0, 1)$

Regel 4: bepaal de snelheid van de voetganger

Als $gap(p) \geq v_p + 1$

Dan $v_p = \min(v_p + 1, v_{\max})$

Anders $v_p = gap(p)$

Regel 5: verwisseling van posities ter voorkoming van mogelijke *deadlocks*

Als de voetganger een andere voetganger ziet met tegengestelde looprichting

En $space(p) = 0$ of $space(p) = 1$

Dan

Of $v_p = v_p + 1$ met kans p_{exchg}

Of $v_p = 0$ met kans $(1 - p_{exchg})$

► **BIJLAGE D: AANGEPAST A* ALGORITME**

Om het A* algoritme bruikbaar te maken voor de simulatie van voetgangersstromen heb ik het originele algoritme aangepast. Dit aangepaste algoritme is in deze bijlage opgenomen.

Het algoritme

Stap 1:

Maak de OpenList leeg.
Maak de ClosedList leeg.
Voeg het beginpunt toe aan de OpenList.

Herhaal de volgende stappen.

Stap 2:

Zoek het hokje met de laagste F in de OpenList.

Stap 3:

Maak het bij stap 2 gevonden hokje het Current hokje.
Verwijder dit hokje van de OpenList.
Voeg dit hokje toe aan de ClosedList.

Stap 4:

Onderzoek elk van de 8 direct omliggende hokjes rond het Current knooppunt. Negeer het hokje in elk van de volgende gevallen:

- Het hokje is niet begaanbaar (omdat daar bijvoorbeeld een muur staat)
- De ClosedList bevat het hokje al (omdat dit hokje reeds eerder bezocht is)
- Het Current knooppunt en het hokje grenzen aan hetzelfde hokje dat niet begaanbaar is.

Doe het volgende als de bovenstaande gevallen zich niet voordoen:

Voeg het hokje toe aan de OpenList en bereken G, H en F voor dit hokje. Maak de Parent-eigenschap van het hokje gelijk aan het Current hokje, het pad tot dit hokje gaat namelijk via het Current hokje.

Als de OpenList het bovenstaand hokje al bevatte, kijk of het pad van het Current hokje naar dit hokje korter is dan het al eerder opgeslagen pad van dat hokje. Dit kan gedaan worden door naar de G-waarde te kijken. Als het pad van het Current hokje naar dit hokje op de OpenList resulteert in een lagere G-waarde voor dat hokje, verander dan de G-waarde en maak de Parent-eigenschap van het hokje op de OpenList gelijk aan het Current hokje.

Stap 5:

Stop als:

de eindbestemming toegevoegd is aan OpenList, wat betekent dat het pad gevonden is, of

als de OpenList leeg is, wat betekent dat er geen mogelijk pad gevonden is.

Ga anders naar Stap 2.

Het kortste pad kan gevonden worden door te kijken naar de Parent-eigenschap van het eindpunt. Hierdoor vindt je het vorig knooppunt, waarbij je weer naar de Parent-eigenschap kijkt, enz. Uiteindelijk wordt er naar het beginpunt gewezen.

► **LITERATUURLIJST**

- [1] Blue, V.L. & Adler, J.L. *Cellular automata model of emergent collective bi-directional pedestrian dynamics*. (2000)
Artificial Life VII, the seventh international conference on the simulation and synthesis of living systems.
- [2] Blue, V. L. & Adler, J.L. Emergent fundamental pedestrian flows from cellular automata microsimulation.
Transportation Research Record 1644, 29-36.
- [3] Blue, V.L. & Adler, J.L. *Modeling four directional pedestrian movements*. (2000). Transportation Research Board 79th annual meeting.
- [4] Boulougouris, E.K., en A. Papanikolaou.
Modeling and simulation of the evacuation process of passenger ships.
http://www.naval.ntua.gr/~sdl/Publications/Proceedings/IMAM2002_Proceed57.pdf
- [5] Fruin, J. J. *Pedestrian Planning & Design*. (1971)
- [6] Helbing, D. *Traffic and Related Self-Driven Many-Particle Systems*. (2001)
http://de.arxiv.org/PS_cache/cond-mat/pdf/0012/0012229.pdf
- [7] Helbing, D., Molnar, P., Farkas, I.J. & Bolay, K.
Self-organizing pedestrian movement.
Environment and Planning B: Planning and Design 2001, volume 28
- [8] Hoogedoorn, S. *Voetgangers op niveau gemodelleerd*.
Technische Universiteit Delft.
<http://vkk042.citg.tudelft.nl/verkeerskunde/pedestrian/Voetgangersopniveau-gemodelleerd.htm>
- [9] Incontrol Enterprise Dynamics. *Simulatie in het algemeen*. (2004)
Intern document.
- [10] Law, A. M. & Kelton, W. D. *Simulation modeling and analysis*. (1982)
- [11] Lester, P. *A* Pathfinding for beginner*.
<http://www.policyalmanac.org/games/aStarTutorial.htm>
Laatst bezocht op: 10-6-2004
- [12] Lin, M. C. & Gottschalk, S.
Collision detection between geometric models: a survey.
<ftp://ftp.cs.unc.edu/pub/users/manocha/PAPERS/COLLISION/cms.pdf>
Laatst bezocht op: 10-6-2004
- [13] Logghe, S. & Yperman, I.
De dynamica van congestie en prijsbeleid. (2003)
http://www.tmleuven.be/Verkeer/Artikel_200302.pdf
- [14] Loscos, C. *Simulating pedestrian crowd behaviour in virtual cities*.
http://www.equator.ac.uk/PublicationStore/Tech_David_Marchal_2002.pdf
- [15] Nagel, K. & Schreckenberg, M. A cellular automaton model for freeway traffic. (1992). Journal de Physique I.
<http://edpsciences.nao.ac.jp/articles/jp1/pdf/1992/12/jp1v2p2221.pdf>
- [16] Power, D. J.
Decision support systems: Concepts and Resources for Manager.
Quorum Books (2002)
- [17] Teknomo, K. *Microscopic Pedestrian Flow Characteristics: Development of an Image Processing Data Collection and Simulation Model*.

- <http://people.revoledu.com/kardi/publication/Dissertation.pdf>
- [18] Tijms, H.C. & Kalvelagen, E.M.F. *Modelbouw in de operations research*. Academic Service (1994)
- [19] *Capacity Analysis of Pedestrian and Bicycle*
http://www.walkinginfo.org/task_orders/to_8/to8/chap13/contents.htm#contents