

FFFSim evacuieren gesimuleerd

Bachelorscriptie voor 15 ECTS van
Diederick Veldhuijzen van Zanten

Eerste beoordelaar: Frank Dignum

Voorwoord

De eerste keer dat ik bij TNO het filmpje te zien kreeg van een proef die de nieuwjaarsbrand in 't Hemeltje in Volendam nabootste, is mijn angst voor branden vertienvoudigd. Het filmpje toont een vlammetje in de kerstversiering die aan het plafond hangt. In ongeveer een minuut groeit het vlammetje uit tot de grootte van een klein haardvuur; dit is het moment waarop ik dacht: het zou een goed idee zijn als iemand een brandblusser gaat halen. Een kleine minuut later staat het gehele plafond in brand, hangt de ruimte vol met een verstikkende rook en is 't Hemeltje een hel geworden.

Sindsdien kijk ik met andere ogen naar nooduitgangen en de bijbehorende bewegwijzering. En ik laat ook nooit meer een zweem brandlucht voorbijgaan zonder te checken of er inderdaad niets in de fik staat.

Deze scriptie verhandelt over hoe mensen vluchten in noodsituaties en hoe je dat kunt simuleren. Deze kennis is hard nodig, om in de situaties zoals in 't Hemeltje iets veiliger te kunnen maken. Iedere seconde telt als je vlucht voor een brand. Laat de vluchtweg dan in ieder geval geen obstakel zijn.

Er zijn zaken in het leven waarvan je hoopt dat ze je in eerste instantie goed afgaan. Je middelbare-schoolexamen maken, je rijbewijs halen of een dienblad vol wijnglazen verplaatsen. Deze scriptie was niet een van die dingen.

Het lijstje mensen dat mij heeft geholpen bij het schrijven van dit document is langer dan de ledenlijst van een gemiddelde sportclub. Drie mensen verdienen expliciete dankwoorden: mijn ouders en mijn vriendin. Zij hebben nooit het geloof verloren en mij steeds opnieuw motivatie kunnen geven. Mijn dank is groot.

Diederick

Samenvatting

De onderzoeksvraag van deze scriptie is: *Welke aanpassingen aan het sociale-krachtenmodel zijn nodig om evacuaties uit een tunnel te kunnen simuleren?*

TNO was op zoek naar een manier om het loopgedrag van grote groepen mensen te simuleren, zowel voor het simuleren van evacuaties als van rellen. Als basis voor deze simulatie was gekozen voor het sociale krachtenmodel van Helbing en als startcasus het evacueren uit een tunnel. In dit licht is de onderzoeksvraag ontstaan.

Om hierop antwoord te kunnen geven is het eerst van belang te weten wat het gedrag is van voetgangers in normale omstandigheden. Daarna kan gekeken worden hoe hun gedrag wijzigt bij noodsituaties. Uit onderzoek van TNO bleek dat een belangrijke factor bij evacuaties de onzekerheid over de exacte situatie is. Deze onzekerheid zorgt voor een trage aanvang van de evacuatie; mensen gaan naar elkaar kijken, en als ze dan eindelijk toch gaan evacueren, gaan ze nog even terug om bijvoorbeeld hun auto op slot te doen.

Het te bouwen simulatiemodel moest dit gedrag kunnen weergeven, liefst op een intuïtieve, goed te begrijpen manier. Ook de invloed van andere mensen in de omgeving op het gedrag moet worden gesimuleerd.

Het sociale krachtenmodel ontbeert een model van het redeneren van de gesimuleerde mensen (*agents*). Het eerste antwoord op de onderzoeksvraag is dan ook dat de agents de mogelijkheid moeten krijgen om te kunnen redeneren. Het tweede deel van het antwoord bevat de notie dat het gedrag afhankelijk is van het gedrag van andere agents.

Het toevoegen van een BDI-architectuur met overtuigingen, wensen en intenties van een agent is een goede manier om beide mogelijk te maken. De variabele *dreigingsbesef* geeft de mate aan waarin een dreiging ervaren wordt. Als het dreigingsbesef te hoog wordt, past de agent zijn gedrag aan en gaat evacueren. Ook wordt toegevoegd dat een agent bij een groep behoort.

Om de BDI-architectuur te implementeren wordt gekozen voor 3APL. Deze taal is ontwikkeld door de universiteit Utrecht en biedt een raamwerk om overtuigingen, doelen en plannen van een agent te simuleren. Deze scriptie sluit af met een bespreking van de gekozen implementatie en de overwegingen die hieraan ten grondslag liggen.

Als laatste vergelijk ik het gecreëerde model met het model van Geraerts e.a., omdat dit een recent model is, dat deels op dezelfde gedachten gestoeld is als mijn model.

Inhoudsopgave

Voorwoord.....	2
Samenvatting	3
Inhoudsopgave	4
1 Inleiding	6
1.1 Aanleiding	6
1.2 TNO.....	7
1.3 Stageopdracht	8
1.4 Plaatsing van dit onderzoek binnen CKI.....	9
1.5 Indeling van deze scriptie	10
2 Onderzoeksvraag	11
2.1 Hoofdvraag.....	11
2.2 Deelvragen	12
3 Methoden	13
4 Voetgangersgedrag	14
4.1 Normaal voetgangersgedrag van individuen.....	14
4.1.1 Het fundamentele diagram.....	15
4.1.2 Persoonlijke ruimte	16
4.2 Normaal voetgangersgedrag van groepen.....	16
4.2.1 Oscillatie.....	16
4.2.2 Lane formation	17
4.3 Gedrag in noodsituaties.....	19
4.3.1 Arching.....	19
4.3.2 Case-studies	20
4.3.2.1 Kuddegedrag	20
4.3.2.2 Verdrukking.....	21
4.3.2.3 Alarmbellen en andere informatie	21
4.3.2.4 Gedragsverandering	21
4.3.2.5 Andere waarnemingen	22
4.3.3 Paniek	23
5 Voetgangersmodellering	25
5.1 Macroscopische modellen	25
5.2 Microscopische modellen	25
5.2.1 Sociale-krachtenmodel	27
5.2.2 Formulering.....	28
5.2.3 Paniekfactor	31
5.3 Uitbreidingen	32
5.3.1 Initieel gedrag	32
5.3.2 Dreigingsbesef.....	33
5.3.3 Blikveld	35
5.4 Simulaties	35
5.4.1 Bestaande simulaties.....	35
5.4.2 Agents.....	36

5.4.3	3APL	37
5.4.3.1	De redeneercyclus van 3APL	37
5.4.4	FFFSIM	38
5.4.4.1	Mensmodel en groep.....	40
5.4.5	Uitwerking van formules	40
5.4.5.1	Formules die de sociale krachten beschrijven	41
5.4.5.2	Formules die de krachten van de omgeving beschrijven	43
5.4.5.3	Formules die het doel bepalen.....	44
5.4.6	De simulatiecyclus	45
5.5	Overdenkingen bij de implementatie	46
5.5.1	Gezondheidssimulatie	46
5.5.2	Tijdstap	47
5.5.3	Routes.....	47
5.5.4	Zelfversterkende cyclus	47
5.5.5	Dreigingsbesef versus paniekfactor	47
5.5.6	Groepen	48
5.5.7	Uitbreiding redeneren	48
6	Het werk van Geraerts e.a.	49
6.1	Navigation Mesh	49
6.2	Crowd Simulation	50
6.3	Sociale groepen.....	52
6.4	Streaming	53
7	Vergelijking FFFSim vs. Geraerts	55
7.1	BDI-architectuur.....	55
7.2	Padplanning	55
7.3	Computationele afwegingen	56
7.4	Groepsmodel	57
8	Antwoord op de onderzoeksvraag	59
8.1	Antwoord op de deelvragen	59
8.1.1	Wat is het gedrag van voetgangers?.....	59
8.1.2	Hoe verandert dat gedrag in noodsituaties?.....	59
8.1.3	Zijn er andere modellen die (delen van) dit gedrag beschrijven?.....	59
8.1.4	Wat is het sociale-krachtenmodel?	59
8.1.5	Welke aanpassingen moeten aan dit model gedaan worden?	60
8.1.6	Hoe kan dit model geïmplementeerd worden?.....	60
8.1.7	Welke problemen komen bij deze implementatie naar boven? 60	
8.2	Antwoord op de onderzoeksvraag	60
9	Discussie	62
10	Literatuur	63

1 Inleiding

Deze scriptie gaat over mijn onderzoek naar het simuleren van het vluchtgedrag van mensen in noodsituaties. TNO wilde een simulatie kunnen doen van het gedrag bij een tunnelbrand. De redenen hiervoor waren twee recente tunnelbranden in de Alpen en een experiment van TNO naar het gedrag van mensen bij een ogenschijnlijke tunnelbrand. Tijdens mijn stage bij TNO heb ik aan dit onderzoek meegewerkt. Deze scriptie brengt u de resultaten van dit onderzoek.

1.1 Aanleiding

Het jaar 1999 was een slecht jaar voor de tunnelveiligheid. In de Mont-Blanctunnel tussen Frankrijk en Italië en de Tauerntunnel in Oostenrijk vielen respectievelijk 39 en 12 slachtoffers.

In de Mont-Blanctunnel vloog een vrachtwagen met margarine in brand, waarschijnlijk door een smeulende sigarettenpeuk. Het vuur uit de vrachtwagen sloeg over naar andere vrachtwagens en auto's. Dagen later pas was de brand uitgewoed. De brand kostte 39 mensen het leven. 29 mensen werden in hun auto gevonden en waren dus niet gevlucht. Zeven mensen waren omgekomen toen zij vluchtten en stikten in de dikke rook. Twee mensen waren gevlucht naar een van de 24 in de tunnel aanwezige vluchtruimten maar konden niet gered worden. Eén brandweerman overleed aan zijn verwondingen. De Mont-Banctunnel bleef ruim een jaar gesloten voor herstelwerkzaamheden en het aanbrengen van nieuwe veiligheidsvoorzieningen (Peter, 2000).

In de Tauerntunnel vond een kettingbotsing plaats. In de tunnel waren werkzaamheden aan de gang, waardoor een er voor een deel van de tweebaans tunnel maar één rijbaan beschikbaar was. Om het verkeer uit beide richtingen doorgang te kunnen geven gebruikte men stoplichten. Een vrachtwagen reed achterop een auto die stond te wachten voor het stoplicht. Een van de betrokken vrachtwagens was geladen met gevaarlijke stoffen. Deze vatten vlam en gaven de aanzet tot een brand waarin uiteindelijk veertig voertuigen bij betrokken raakten. Twaalf mensen kwamen om, waarvan er acht al bij de aanrijding. Drie doden werden in hun auto teruggevonden. Een persoon was op de vlucht omgekomen. Het duurde drie maanden om de schade te herstellen (Peter, 2000).



Figuur 1 Na de brand in de Tauerntunnel bekijken brandweerlieden de schade.

Tunnelbranden zijn zeer gevaarlijk om een aantal redenen. De warmte en de rook kunnen de tunnel niet uit. Hierdoor kan de hitte niet weg en kan de temperatuur oplopen tot boven de 1000 graden Celsius. Vanwege de allesverzengende hitte is blussen zeer moeilijk en gevaarlijk en soms zelfs onmogelijk. De rook kan niet weg en hoopt zich op. Iedereen die nog niet uit zijn auto weg is, kan nu niet meer vluchten zonder het grote risico in de rook te stikken. De gevolgen van een tunnelbrand zijn te zien in Figuur 1.

Een van de vragen die deze beschrijvingen oproept is waarom mensen in hun auto blijven zitten als zich er toch voor hun ogen een ramp ontwikkelt. Blijkbaar is het voor velen moeilijk te beginnen met vluchten. Om gedrag tijdens noodsituaties zoals hierboven beschreven te kunnen begrijpen en te simuleren is onderzoek nodig. Deze scriptie gaat daarover.

1.2 TNO

De Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek TNO is een organisatie die onderzoek doet op velerlei terreinen. TNO zegt over zichzelf op haar website:

"TNO maakt innoveren mogelijk door wetenschappelijke kennis te vertalen naar de praktijk."

TNO is opgericht op initiatief van de overheid om wetenschappelijke kennis toepasbaar te maken. Dit doet zij door praktisch wetenschappelijk onderzoek te verrichten in opdracht van bedrijven, instellingen en overheden. Dit betreft onderzoek op allerlei gebieden, van wapensystemen tot voedsel, van milieu tot brandveiligheid. Een deel van het onderzoek vindt plaats in Europese en internationale projecten met partners van over de hele wereld.

Door dit onderzoek kan TNO naast patenten, hard- en software ook adviezen en keuringen leveren.

TNO heeft meerdere vestigingen in Nederland, onder andere in Den Haag, Soesterberg en Rijswijk. Deze locaties vormen samen het kerngebied *TNO Defensie en Veiligheid*. De grootste opdrachtgever van dit kerngebied is het Ministerie van Defensie. De andere kerngebieden heten *TNO Kwaliteit van Leven*, *TNO Industrie en Techniek* en *TNO Informatie- en Communicatietechnologie*.

De locatie in Soesterberg herbergt het onderzoek naar *Human Factors*. Dit is onderzoek naar de invloed van de menselijke factor in allerlei verschillende taken. Voorbeelden van vragen die in dit onderzoek worden gesteld zijn: Hoe groot is de invloed van het menselijke gedrag op de prestatie van de gevechtsgroep? Wat is een goede commandostructuur? Hoe kleeft je een brandweerman opdat hij zijn werk zo goed mogelijk kan doen? Wat is de invloed van vermoeidheid op het gedrag van verkeersdeelnemers?

De afdeling *Human in Command* doet onderzoek naar de menselijke factor in commandosituaties, in het leger maar ook in bijvoorbeeld verkeerscentrales. Een belangrijk aspect hierbij is de interactie met intelligente systemen. Deze systemen moeten zo ontworpen worden dat de juiste informatie op het goede moment in de meest begrijpelijk vorm aan de gebruiker getoond wordt. De afdeling *Human in Command* geeft een wetenschappelijk antwoord op de vraag welke informatie van belang is, wat het juiste moment is deze informatie aan de gebruiker te tonen en wat dan de beste manier van tonen is. Dr. Louis Boer richt zich op het menselijke gedrag in noodsituaties; bij ontruiming en evacuatie. Ik heb stage gelopen bij Human in Command onder begeleiding van Dr. Boer.

1.3 Stageopdracht

De stageopdracht bestond uit twee delen. Allereerst het ontwikkelen van een mensmodel ten behoeve van een computersimulatie van voetgangers bij ontruiming en rellen. Dit project heet *Fight, Flight and Fright Simulated (FFFSim)*¹. Tot dit project behoren ook het meewerken aan de softwareontwikkeling en het valideren van deze computersimulatie aan de hand van reeds door TNO verkregen data (Boer, 2004).

Ten tweede het assisteren bij experimenteel onderzoek. Dit komt neer op het assisteren van mijn begeleider bij zijn onderzoek. In het kader hiervan heb ik meegeholpen aan een studie naar de veiligheid van het klimmen op een loodsladder -een stevige touwladder waarlangs loodsen aan boord van schepen klimmen (Boer, 2005 & 2006).

Daarnaast was het opdoen van 'werkervaring' een van de doelen van de stage. Daaronder vallen communiceren binnen een grote organisatie, samenwerken, schrijven, presenteren; dit alles binnen de toegepast wetenschappelijke omgeving van TNO.

Het project FFFSim was al gestart toen ik begon. Een eerste opzet voor het model was al gemaakt. Het model om het voetgangersgedrag te simuleren

¹ De mooie Nederlandse vertaling is VVVSsim: Vecht, Vlucht en Vrees simulatie

was al gekozen. Mijn taak was dit model verder uit te breiden. Daartoe moest ik eerst zelf een literatuurstudie doen. Ik moest gedragsregels destilleren uit het gedrag in noodsituaties zoals dat beschreven is in de literatuur. Deze regels en hun onderlinge samenhang moesten zover uitgewerkt worden dat de softwareprogrammeurs van TNO-vestiging Den Haag het model konden automatiseren. Samenwerken met deze programmeurs om problemen te voorkomen of op te lossen behoorde ook tot het takenpakket. Als laatste zou ik ook het programma testen om te kijken in hoeverre de simulaties overeenkwamen met de data uit de eerdere TNO-proef. Gedurende mijn stage werd duidelijk dat het project niet voor het eind van mijn stage in een evalueerbaar prototype zou uitmonden, omdat het programmeren meer tijd vroeg dan verwacht. Daarom heb ik uiteindelijk zelf het model in de applicatie geprogrammeerd en het model niet getest.

Het tweede deel van de stageopdracht werd pas in de loop van de stage duidelijk toen zich een project aandiende bij mijn stagebegeleider waarbij ik ervaring kon opdoen in toegepast onderzoek. Het betrof een project voor de Europese scheepvaartautoriteiten naar de veiligheid van het klimmen op loodsladders. Na een evacuatie van een passagiersschip zitten de schipbreukelingen in reddingsvloten. Een klim aan een loodsladder is vaak de enige manier om aan boord van een te hulp geschoten schip te komen. Het onderzoek moest antwoord geven op de vraag of en in hoeverre klimmen op een loodsladder moeilijk en gevaarlijk is. Voor dit project heb ik geassisteerd bij twee experimenten waarbij proefpersonen langs een loodsladder moesten klimmen. De eerste vond plaats in Soesterberg op het terrein van TNO, de tweede in de haven van Boven-Hardinxveld. Bij dit laatste onderzoek zijn ook de snelheid van het inschepen in een reddingsboot en de snelheid van het evacueren via een *chute* -een soort stortkoker voor mensen- onderzocht.

Daarnaast heb ik nog aan twee kleinere projecten meegewerkt. Ik heb een presentatie gegeven over onderzoek van dr. Boer op een wetenschappelijk congres in Wenen (Boer, 2007). Daarnaast heb ik, in datzelfde Oostenrijk, een tunneloperator geïnterviewd over automatische omroepberichten bij incidenten.

Laatste en niet onbelangrijk doel was over deze stage een afstudeerscriptie te schrijven. Deze zou eventueel voor een deel tijdens de stage geschreven kunnen worden. Door tijdsgebrek ben ik daar niet aan toegekomen.

1.4 Plaatsing van dit onderzoek binnen CKI

Een van de vereisten van CKI-scripties is dat ze vertellen waarom ze binnen CKI vallen. Dat moet geen probleem zijn, het gaat over het modelleren van intelligent menselijk gedrag, iets wat uitermate goed binnen de studie past.

Iedere CKI-student heeft verschillende versies van het verhaal over wat hij studeert. De meeste mensen vallen namelijk de schellen van de ogen als je de woorden Cognitieve, Kunstmatige en Intelligentie achterelkaar plaats. Afhankelijk van de omstandigheden en de beschikbare tijd kiest de CKI-student een verhaal uit zijn repertoire. Mijn favoriet is dat ik leer hoe mensen en dieren denken; dat ik leer hoe hun hersenen werken; dat ik leer hoe je dat kunt formaliseren met logica bijvoorbeeld of een andere taal; dat kennis van talen daarom zo belangrijk is als je het hebt over kennis; en dat ik de zo

opgedane kennis uiteindelijk in een computer toepas om deze slimmer te maken.

CKI combineert vakgebieden uit de filosofie, psychologie, taalkunde en informatica. Vooral de psychologie en informatica zullen in deze scriptie aan de orde komen. Daarnaast komen er nog enkele natuurkundige termen naar voren omdat het simuleren van voetgangersgedrag tot nog toe veelal aan natuurkundigen was toevertrouwd. Zij gebruikten daarvoor modellen afgeleid uit de (vloeistof)mechanica en veel modellen zijn daar nu nog op geënt.

Het gedrag dat mensen vertonen wanneer zij vluchten is een psychologisch interessante vraag. Waar letten deze mensen op? Hoe bepalen zij hun looprichting en snelheid. In hoeverre spelen sociale factoren een rol. Hoe je een simulatie maakt met agents die allemaal hun eigen voorkeuren hebben is daarentegen een informatica-probleem.

Het combineren van psychologie en informatica, het formaliseren van gedrag om het in een computersimulatie toe te passen is naar mijn mening echt een CKI-onderwerp. Ik heb dat ook tijdens mijn stage gemerkt. Tijdens een bijeenkomst met psychologen en informatici kon ik als intermediair fungeren, wat voor mij de waarde van CKI onderstreepte.

1.5 Indeling van deze scriptie

Deze scriptie zal allereerst in hoofdstuk 2.1 een onderzoeksvraag definiëren.

Naar aanleiding van deze onderzoeksvraag kunnen een aantal deelvragen gesteld worden. Deze staan beschreven in hoofdstuk 2.2.

In hoofdstuk 3 zal ik behandelen hoe ik het antwoord op de verschillende vragen heb proberen te vinden door mijn methoden kort toe te lichten.

Daarna zal ik in hoofdstuk 4 de deelvragen stuk voor stuk beantwoorden. Dit begint algemeen in 4.1 over het gedrag van een enkele voetganger. In 4.2 worden specifiek de factoren die een rol spelen met voetgangersgedrag in groepen. Voetgangersgedrag tijdens noodsituaties is het onderwerp van hoofdstuk 4.3. De verschillen met gedrag van voetgangers in normale situaties komen hier aan de orde.

Daarna volgt een bespreking van de theoretische modellen die in de literatuur bekend zijn (5.1 en 5.2) en de uitbreidingen die nodig zijn voor de simulatie van vluchtgedrag (5.3). In 5.4 bespreek ik de simulaties die aan de hand hiervan zijn gemaakt. In 5.4.4 en verder zal ik toelichten hoe het model voor mijn simulatie tot stand is gekomen en wat de sterke en zwakke punten hiervan zijn ten opzichte van de reeds bestaande modellen.

In hoofdstuk 6 geef ik een overzicht van het werk van Geraerts, in hoofdstuk 7 vergelijk ik zijn model met het mijne. Dan volgt het antwoord op de onderzoeksvragen in hoofdstuk 8.

Hoofdstuk 9 biedt een discussie over het onderzoek, mogelijke onderwerpen van verder onderzoek en een toekomstvisie op dit wetenschapsgebied.

Hoofdstuk 10 is de literatuurlijst. Hier staat alle literatuur waar in deze scriptie naar verwezen wordt.

2 Onderzoeksvraag

TNO heeft zich tot doel gesteld om zich meer te profileren als kennisbank voor veiligheidsvraagstukken. Het project dat deze intentie vormgeeft, is genaamd SIMV, Systeem Innovatie Maatschappelijke Veiligheid. Het maakt onderscheid tussen drie onderwerpen de *mens*, de *organisatie* en de *omgeving*. Onderwerpen die bij de mens aan de orde komen zijn brandwerende kleding, trainingen, giftigheid van stoffen en dergelijke. De organisatie betreft het ontwikkelen van rampenplannen, communicatieprotocollen, oefeningen etc. Veiligheid voor de omgeving gaat voor een deel over bouwvoorschriften, materiaalkeuze en structurele veiligheid van gebouwen. Daarnaast ook over het zodanig ontwerpen van gebouwen dat een evacuatie van personen snel en veilig kan verlopen. Of het zodanig inrichten van een stadion en de omliggende ruimte dat na het einde van een voetbalwedstrijd de vertrekkende menigte snel en veilig haar weg kan vinden. Het aangeven van vluchtwegen behoort hierbij, maar ook methoden om rellen te voorkomen en te beteugelen.

Hier zijn we aangekomen bij het werkpakket *Veilig gedrag*. De onderzoeksvraag komt uit een project om voetgangersgedrag te simuleren bij evacuaties en uiteindelijk ook bij rellen. Indachtig de tunnelrampen in de Alpen en een onderzoek van TNO naar gedrag bij brand in een tunnel is als eerste testcase voor dit gedrag een tunnel gekozen. Dit houdt ook de complexiteit van de omgeving laag.

Een inventariserend onderzoek had verschillende voetgangersmodellen bekeken. De geschiktste kandidaat om de simulatie op te bouwen was het sociale-krachtenmodel (zie 5.2.1). Met deze kennis kan de onderzoeksvraag gesteld worden.

2.1 Hoofdvraag

De doelstelling die door TNO geformuleerd is, geeft aanleiding tot de hoofdvraag:

"Welke aanpassingen aan het sociale-krachtenmodel zijn nodig om evacuaties uit een tunnel te kunnen simuleren?"

Mijn opdracht was om het mensmodel te maken op basis van het sociale-krachtenmodel. Het mensmodel moest zo opgeleverd worden dat het bijna direct geïmplementeerd kon worden in de simulatiesoftware. Daarnaast moest het goed gedocumenteerd zijn waarom bepaalde keuzes gemaakt waren.

2.2 Deelvragen

De hoofdvraag geeft aanleiding tot enkele deelvragen.

- I. Wat is het gedrag van voetgangers?
Inzicht in het normale gedrag van voetgangers is noodzakelijk om hun gedrag in noodsituaties te begrijpen. Hoe snel loopt een voetganger en hoe lang duurt het om te stoppen? Welke sociale conventies spelen een rol? Dit zijn de vragen die eerst een antwoord verdienen.
- II. Hoe verandert dat gedrag in noodsituaties?
De assumptie² dat het gedrag in heikele situaties niet fundamenteel verschilt van dat in alledaagse omstandigheden ligt ten grond aan deze vraag. Welke factoren worden belangrijker in de beslissing een bepaalde kant op te lopen. Wat is de verandering in gedrag ten opzichte van medevoetgangers.
- III. Zijn er modellen die (delen van) dit gedrag beschrijven?
Wetenschap is gebaat bij een constante kennisdeling. Om een nieuw model te maken is het goed eerdere modellen te bestuderen en hun sterke en zwakke punten te kennen.
- IV. Wat is het sociale-krachtenmodel?
Dit model is uiteindelijk gebruikt als uitgangspunt voor FFFSim. Om dit model te kunnen gebruiken moet het geheel doorgrond worden. Hoe werkt het? Wat kan het wel en wat kan het niet modelleren. Het antwoord op deze vraag leidt naar de geboorte van een nieuwe simulatietool.
- V. Welke aanpassingen moeten aan dit model gedaan worden?
Om de overgang van normaal naar vluchtend loopgedrag te simuleren zijn een aantal uitbreidingen en aanpassingen nodig. Welke zijn noodzakelijk en waarom. Sommige aanpassingen zijn optioneel. Wat kunnen deze toevoegen aan de simulatie?
- VI. Hoe kan dit aangepaste model geïmplementeerd worden?
Hoe kan dit theoretische wiskundige model in simulatiesoftware ingepast worden? De verschillen tussen het theoretische model en de praktische werkelijkheid van het programmeren leveren problemen en vragen om oplossingen.
- VII. Welke problemen komen bij deze implementatie naar boven?
Bij een groot softwareproject komen altijd problemen naar boven waar van tevoren niet op gerekend was. Welke waren dat in dit geval en hoe zijn ze opgelost.

²Zie Zie 4.3 voor een onderbouwing van deze assumptie

3 Methoden

Voor het onderzoek is gebruik gemaakt van een literatuuronderzoek. Naast publicaties in wetenschappelijke tijdschriften en boeken heb ik ook gebruik gemaakt van interne TNO-rapporten.

Voor de simulatie is gebruik gemaakt van de programmeertalen Python en 3APL en het *agent management system* Spyse. Een uitgebreide beschrijving van de simulatiesoftware staat in 5.4.4.

4 Voetgangersgedrag

Mijn onderzoek kan redelijk langs de volgende lijn gelegd worden: Allereerst ga ik onderzoeken hoe een normale voetganger zich gedraagt. Daarna hoe dat gedrag verandert wanneer er gevaar dreigt, in het bijzonder als ze te voet samen met anderen moeten vluchten voor een brand. Deze kennis ga ik formaliseren door haar in regels vast te leggen. Daarna ga ik deze regels op een computer zichtbaar maken in een simulatieprogramma.

4.1 Normaal voetgangersgedrag van individuen

Om loopgedrag in noodsituaties te kunnen beschrijven en simuleren is ook kennis nodig van het loopgedrag in normale omstandigheden. In het komende gedeelte zal ik enkele observaties beschrijven van normaal menselijk loopgedrag. Een model zal deze verschijnselen ook moeten kunnen laten zien.

Voor voetgangers is er een groot aantal factoren van belang, meer dan bij autoverkeer. Autoverkeer is discreter, omdat er maar een beperkt aantal rijbanen beschikbaar is en elke rijbaan maar één auto breed is. Toch is het nog steeds erg moeilijk om bijvoorbeeld files te beschrijven. De bestuurders rijden weliswaar in eendimensionale rijen achterelkaar aan, toch kunnen er complexe patronen van remmen, stilstaan, optrekken en rijbaan wisselen ontstaan (Hoogendoorn, 2001).

Het ontstaan van files kan zelfs het gevolg zijn van één persoon die remt. Als het druk is zal de bestuurder achter die auto namelijk ook moeten remmen. De meeste bestuurders remmen uit voorzorg iets meer dan werkelijk nodig. Als een rij bestuurders achterelkaar steeds meer moet gaan remmen, zal er op een gegeven moment iemand tot stilstand komen. Als de aanvoer van auto's achter deze auto groter is dan de snelheid waarmee de voorste auto's kunnen optrekken ontstaat er een zogenaamde 'spookfile', zonder aanwijsbare oorzaak. Er is geen ongeluk, noch zijn er wegwerkzaamheden (Sugiyama, 2008)³

Een groot verschil met autoverkeer is dat voetgangers zich in een tweedimensionale continue ruimte bevinden. Vooral in grote open ruimtes heeft dit grote gevolgen. Op pleinen loopt iedereen kriskras door elkaar. Vastgestelde paden bestaan niet; zij ontstaan voor een deel omdat veel vertrekpunten en bestemmingen dezelfde zijn. Op een plein bij een station zullen dus veel voetgangersstromen van en naar dat station lopen, omdat veel mensen daar nu eenmaal vandaan komen of naar toe moeten.

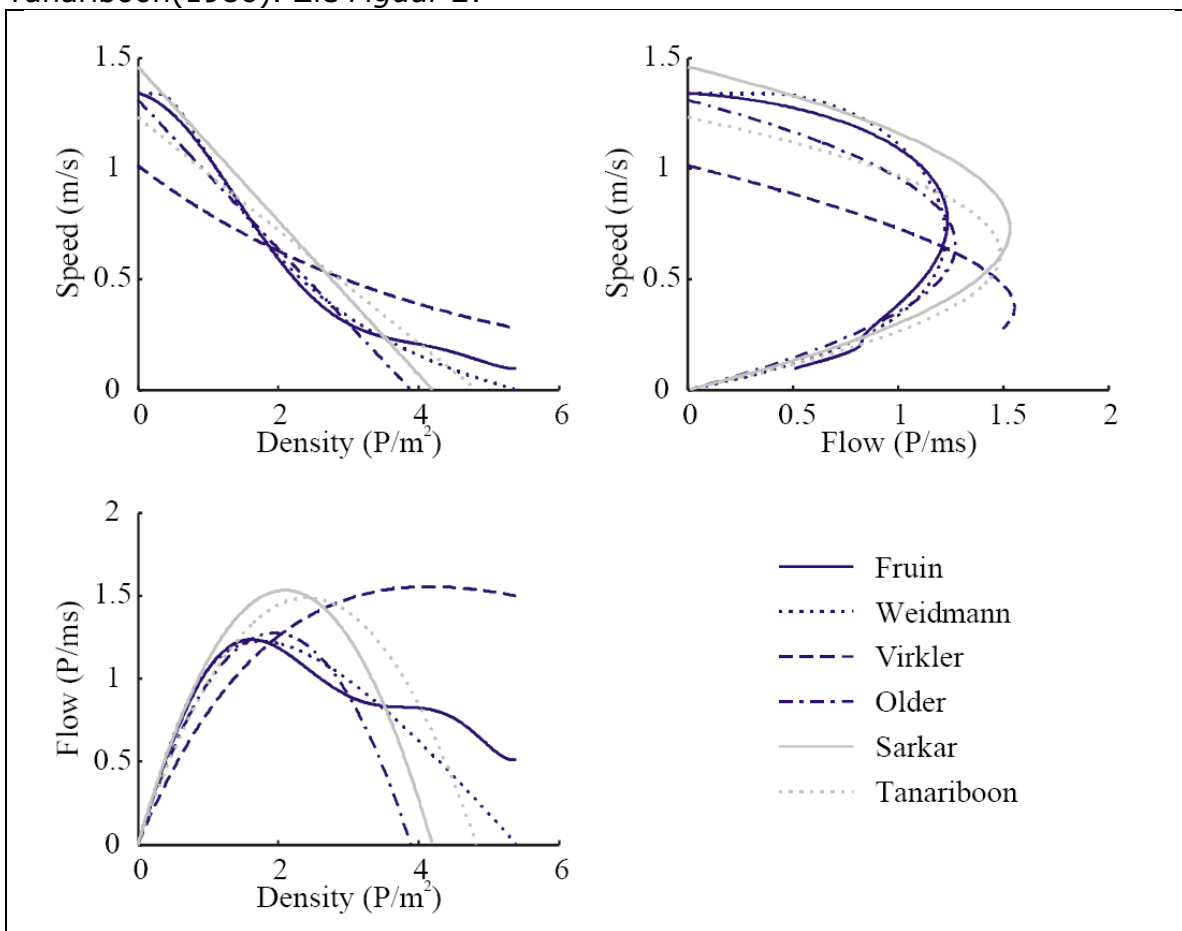
De gemiddelde snelheid waarmee voetgangers zich voortbewegen als zij ongehinderd kunnen lopen wordt in het Engels *free speed* genoemd; ik zal de term biologische snelheid gebruiken, omdat het de snelheid is waarmee iemand loopt als er geen enkele invloed is op de looper. Geen obstakels, geen hellingen, geen tegenliggers, geen haast of stress, alleen maar de snelheid waarmee deze persoon het liefste loopt. De biologische snelheid is ongeveer 1.3 meter per seconde (m/s) (Fruin, 1971), met een standaard afwijking van 0.3 m/s. Recente observaties in grote steden meten hogere snelheden, met als nummer één de stad Singapore waar de gemiddelde snelheid van de voetgangers op 1.73 m/s lag (Wiseman, 2007). Het gaat hier om drukke metropolen en veel van de geobserveerde personen zullen waarschijnlijk wel

³ Zie https://www.youtube.com/watch?v=7wm-pZp_mi0 voor een film van het experiment

'haast' gehad hebben. Een psychologische factor in loopsnelheid is dus zeker aanwezig en ook gevonden door Weidmann (1992). Hij vond dat het doel van de voetganger zijn loopsnelheid beïnvloedt. Toeristen liepen veel langzamer (1.10 m/s) dan mensen op weg naar hun werk (1.49 m/s) of mensen aan het werk (1.61 m/s).

4.1.1 Het fundamentele diagram

Een grote rol in de snelheid waarmee wandelaars zich voortbewegen is de drukte van anderen om hen heen. De dichtheid van een menigte beïnvloedt de loopsnelheid aanzienlijk. De relatie tussen snelheid, dichtheid en $flow^4$ wordt in de literatuur het Fundamentele Diagram genoemd. Daamen (2005) geeft een goed overzicht van de studies die er naar deze relaties gedaan zijn door Fruin(1971), Weidmann(1993), Virkler(1994), Older(1968), Sarkar(1997) en Tanariboon(1986). Zie *Figuur 2*.



Figuur 2. Overzicht van het fundamentele diagram van verschillende onderzoekers. Overgenomen uit Daamen(2005).

Zoals goed te zien is neemt de snelheid af als de dichtheid groter wordt, zie de eerste grafiek. De $flow$ heeft een optimum bij een snelheid van ongeveer 0.7 m/s (de tweede grafiek) en een dichtheid van ongeveer 2 personen/m² (derde grafiek). Het betreft hier maar één richting, alle personen lopen

⁴ Het aantal mensen dat de breedte van het pad passeert per seconde per meter. Bij een flow van 2 personen/ms en een pad van 3 meter breed passeren dus 6 mensen per seconde.

dezelfde kant op. Voor situaties met tegenliggers of kruisend verkeer zijn de waarden en grafieken anders. De waarnemingen verschillen licht van elkaar, maar de verschillen worden echt groter waar het hoge dichtheden betreft. Dit komt omdat deze hoge dichtheden vrij zeldzaam zijn en waarnemingen doen moeilijk is. Bovendien worden deze hoge dichtheden vooral gezien bij *bottlenecks*, een versmalling in het pad, een bocht of een kaartcontrole. Dit heeft natuurlijk effecten op de snelheid.

4.1.2 Persoonlijke ruimte

Een ander aspect van de mens is dat hij er een hekel aan heeft dichtbij onbekenden te staan. Als het mogelijk is zal iedereen op een ruime afstand van omstanders blijven. Hoe groot deze afstand is, hangt af van de gelegenheid. Tijdens een popconcert kan dit enkele centimeters zijn, maar op een rustig strand wel tientallen meters. Ook cultuur speelt een grote rol. In het Midden-Oosten staat men dichterbij elkaar dan in Europa.

De denkbeeldige grens die mensen om zich heen trekken markeert hun persoonlijke ruimte. Als je binnen die ruimte komt voelen ze zich onprettig en enigszins bedreigd. De wetenschap van de persoonlijke ruimte heet *proxemics*⁵. Deze term werd voor het eerst gebruikt door Hall in (Hall, 1966). Hij beschreef dit fenomeen voor het eerst en heeft er uitgebreid onderzoek naar gedaan.

Daarnaast bewaren mensen ook een afstand tot objecten. Deze afstand is afhankelijk van de snelheid waarmee men loopt. Bij stilstand willen mensen nog wel eens tegen een muur aanleunen. Tijdens het lopen gaat het lichaam licht slingeren. De fysieke ruimte die benodigd is om contact te vermijden wordt dus groter. Bij grotere snelheden gaan ook de armen zwaaien. De afstand tot de muur waarlangs men loopt, maakt men dan weer iets groter. Men voorkomt zo onzachte contacten tussen hand en muur. Verder doet ook het naar voren zwaaien van de benen de benodigde ruimte toenemen.

De persoonlijke ruimte is niet per se cirkelvormig. In de richting waarin iemand kijkt, wordt nabijheid minder op prijs gesteld. Nabijheid bij de rug wordt minder erg gevonden. Dat komt natuurlijk, omdat je ook niet ziet wat er achter je rug gebeurt.

4.2 Normaal voetgangsgedrag van groepen

Zoals al uit het fundamentele diagram bleek, zijn andere voetgangers van grote invloed op het loopgedrag. In het komende gedeelte zal ik enkele observaties beschrijven van normaal menselijk loopgedrag in groepen. Een model zal deze verschijnselen ook moeten kunnen laten zien.

4.2.1 Oscillatie

Oscillatie is een verschijnsel dat optreedt wanneer twee tegengestelde voetgangersstromen elkaar treffen bij een vernauwde doorgang. Eerst mag vanuit de ene richting een aantal mensen passeren. Hierdoor daalt de 'druk' op de doorgang aan deze kant. Op een gegeven moment ontstaat er een klein gat in de stroom. Op dat moment kan iemand uit de tegenovergestelde richting zijn kans schoon zien om door de deuropening te gaan. Hierdoor verspert hij

⁵ Dichtbijheidskunde is een mogelijke vertaling

het pad voor de andere richting. Andere personen uit de tegenovergestelde richting kunnen nu gemakkelijk achter hem aanlopen. De 'druk' op de deur aan de ander kant neemt echter weer toe totdat er weer een verandering optreedt van de passeerrichting (Helbing 2002).

De sociale omgang tussen mensen heeft ook invloed op dit verschijnsel. Na een bepaalde tijd is het sociaal wenselijk de andere kant ook een vermindering van de wachttijd te gunnen. Tegelijkertijd bouwt de wachtende kant een steeds grotere neiging op door de deur te willen. Zij zal eerder geneigd zijn van de kleine ruimtes tussen de tegenliggers gebruik te maken dan wanneer ze nog niet zo lang heeft moeten wachten.

4.2.2 Lane formation

Lane formation is moeilijk te vertalen. Het betekent ongeveer looppadformatie. Het is een verschijnsel dat ontstaat wanneer voetgangers in tegengestelde richting lopen over afstanden van minstens enkele meters. Er ontstaan dan paden waarin men achterelkaar aan loopt. Zie Figuur 3 en Figuur 4.

Dit verschijnsel ontstaat niet omdat deze mensen graag in rijen willen lopen. Het is een gevolg van botsingmijdend gedrag. Als je tegen een stroom tegenliggers inloopt moet je veel uitwijken, veel vertragen en versnellen; uiteindelijk is het een vermoeiende en onhandige manier. Direct achter iemand die dezelfde kant oploopt als jij zullen zich weinig tegenliggers bevinden. Hierdoor kan je redelijk snel doorlopen zonder botsingsgevaar. De gemiddelde vertraging die een persoon ondervindt door de tegenliggers is daarom beperkt. 5% tot 15% geeft (Weidmann, 1993).

De voetgangersstromen scheiden zich niet altijd op de wijze zoals men dat met auto's gewend is. In rechtsrijdende landen kunnen voetgangersstromen zich best aan de linkerkant van het pad bevinden, maar observaties hebben aangetoond dat landen vaak wel een favoriete uitwijkkant ontwikkelen. Als iedereen naar dezelfde kant uitwijkt, heeft dat voor iedereen voordelen. In Duitsland wijkt men bijvoorbeeld het liefst uit naar rechts, maar ook in het linksrijdende Engeland stapt men liever naar rechts (Helbing 2001).

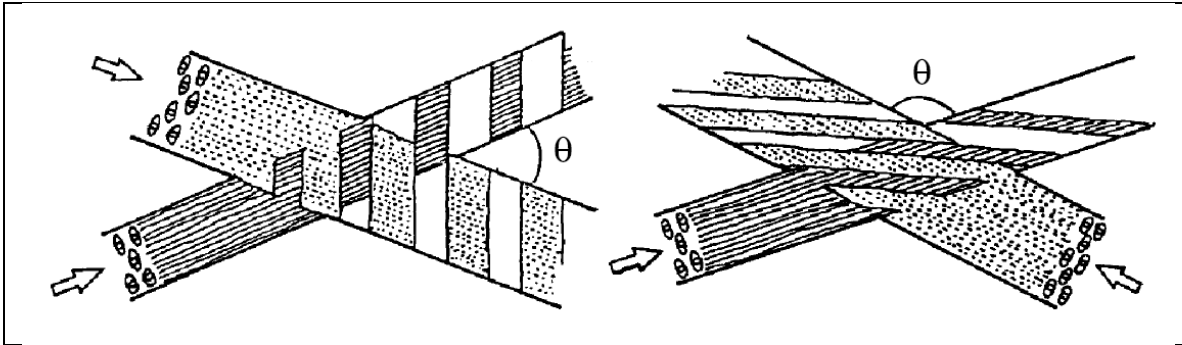


Figuur 3 (links) Deze foto laat een Hongaars winkelcentrum zien waarin twee looppaden zijn ontstaan. Voetgangers houden niet noodzakelijkerwijs rechts als dat de geldende kant van de weg is waarop men rijdt. Foto overgenomen uit (Helbing, 2005).

Figuur 4 (rechts) In deze simulatie zijn drie looppaden te zien. Twee naar beneden en een naar boven. De lengte van de pijl geeft de loopsnelheid aan. Figuur overgenomen uit (Helbing, 1998).

Het combineren van oscillatie bij deuren en lane formation kan zich ook tegelijkertijd voordoen. Dit zorgt ervoor dat wanneer twee tegengestelde voetgangersstromen door twee naast elkaar gelegen deuren moeten, er één deur voor de ene richting gebruikt wordt en de andere voor de andere richting (Helbing, 2002).

Een volgend interessante observatie kan gedaan worden wanneer twee voetgangersstromen elkaar onder een hoek kruisen. Dan ontstaat er *striping*, waarbij een brede groep uit de ene looprichting achter een brede groep uit de andere looprichting loopt. Hierdoor ontstaat een streeppatroon, vandaar de naam. Dit is goed te zien in Figuur 5. Uiteraard zijn dit geïdealiseerde voorstellingen. In werkelijkheid is het patroon chaotischer.



Figuur 5 *Striping* bij het kruisen van twee voetgangersstromen. Overgenomen uit (Helbing, 2001)

4.3 Gedrag in noodsituaties

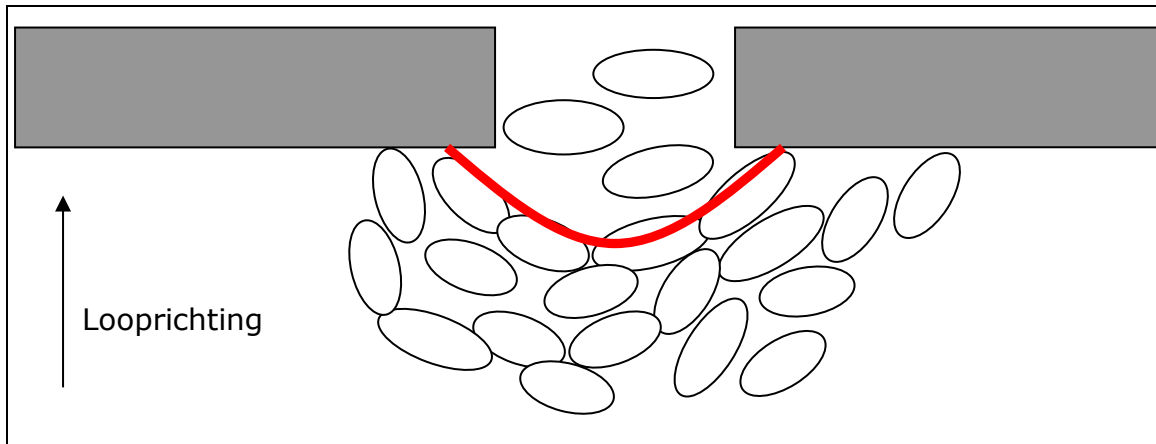
In noodsituaties, wanneer mensen snel weg willen, verandert het gedrag. Geen fundamentele verandering in 'paniek' (zie 4.3.3), met allerlei irrationele en emotionele excessen, maar graduele veranderingen. Mensen gaan bijvoorbeeld sneller lopen. Om een goede simulatie te maken is het noodzakelijk deze verschillen tussen normaal en vluchtend loopgedrag onder ogen te zien.

4.3.1 Arching

Als groep mensen door een deur of een andere versmalling wil gaan ontstaan bijkomende effecten. Iedereen heeft wel eens in een groep gelopen naar een smalle in- of uitgang, bijvoorbeeld bij het verlaten van de bioscoop. Bij de deur ontstaat het dilemma anderen best voorrang te willen geven, maar zelf niet te lang willen wachten en achteropkomers niet te veel te willen ophouden.

Bij een doorgang naar een smaller gedeelte ontstaat vertraging. De brede stroom mensen moet zich ineens door een smalle opening of in een smalle gang persen. Vooral op de hoekpunten van de ingang ontstaan grote dichtheden. Als de dichtheid erg groot wordt ontstaat, *arching*, vrij vertaald bogen. Dit kan gebeuren wanneer groepen mensen snel proberen weg te komen, bijvoorbeeld bij een brand. Door de grote drukte komen de voetgangers fysiek met elkaar in contact en ontstaat een boog. De boog loopt van een deurpost via een aantal personen dat elkaar aan de schouders raakt tot aan de andere deurpost. Zie Figuur 6.

Uit de bouwkunde is bekend dat een boog een sterke structuur is. Als de mensenmassa erachter dringt, kan de druk erg hoog worden. De boog blijft in stand totdat iemand uit de boog deze verbreekt door zijn schouders te draaien en zich zo minder breed maakt. Of zich er door bruut geweld doorheen te duwt, waarbij andere personen in de boog weggeduwd worden; of een stap achteruit te doet, wat erg moeilijk kan zijn door duwende mensen achter hem. Hoe groter de druk, hoe moeilijker het is om de boog te doen verbreken.



Figuur 6 Arching bij een nauwe doorgang. De ovalen zijn de bovenaanzichten van personen. De rode lijn geeft de gevormde boog aan.

Zodra de boog breekt zullen er snel enkele personen door de doorgang kunnen gaan, net zolang tot er weer een boog ontstaat die weer voor oponthoud zorgt. Dit heeft als gevolg dat de doorstroming erg grillig is, soms enkele personen per seconde, soms enkele seconden niemand.

Een groot negatief effect van *arching* is dat het uiteindelijk langer duurt voordat iedereen de ruimte verlaten heeft. Dit wordt in de literatuur het *faster is slower effect*⁶ genoemd. In situaties waar een snelle evacuatie noodzakelijk is, kan dit effect voor veel slachtoffers zorgen.

4.3.2 Case-studies

Uit *casestudies*⁷ komen de volgende waarnemingen naar voren:

4.3.2.1 Kuddegedrag

Wie tot een groep behoort vlucht samen met zijn groep (Bryan 2002, Proulx 2002, Sime 1985). Groepen kunnen verschillende vormen aannemen zoals echtbaar, gezin, reisgezelschap en dergelijke. Vluchten is niet het weggaan van een gevaar, maar het gaan naar een vertrouwde omgeving. De groep hoort bij deze vertrouwde omgeving, net zoals de weg waarlangs men naar binnen is gekomen. Personen die elkaar niet kennen maar toevalligerwijs bij elkaar staan wanneer de evacuatie aanvangt hebben een grotere kans door verschillende uitgangen te vluchten.

Het gedrag van andere mensen heeft ook invloed op de richting waarin men loopt. Mensen zijn geneigd anderen te volgen, kuddegedrag. In (Helbing, 2000) is de grootte van deze invloed afhankelijk van de wat Helbing de 'paniekfactor' noemt. Deze factor vertegenwoordigt grof gezegd de stress onder de mensen in de simulatie. Als de nood hoger wordt, is men eerder geneigd anderen te volgen (Low, 2000).

⁶ Sneller-is-langzamer-effect

⁷ Studies naar aanleiding van één afzonderlijke gebeurtenis. In dit geval onderzoek naar het verloop van branden, instortingen of verdrukkingen bij massale evenementen als popconcerten of voetbalwedstrijden. Deze studies zijn van grote waarde, omdat experimenten met dit soort situaties om begrijpelijke gezondheids- en ethische redenen niet zijn toegestaan.

4.3.2.2 Verdrukking

Menigten kunnen grote druk opbouwen. Er zijn vele voorbeelden van situaties waar door verdrukking doden en gewonden vallen in grote mensenmassa's. Voorbeelden zijn het Heizeldrama in Brussel, waar voor aanvang van een voetbalwedstrijd rellen ontstonden en waarbij de menigte sommigen onder de voet liep. In Saoedi-Arabië waar 50.000 pelgrims tegelijkertijd dezelfde heilige galerij in wilden, kwamen bijna 1500 mensen om door verdrukking of verstikking. De druk kan wel oplopen tot 4500 Newton per meter, genoeg om stenen muurtjes om te duwen of stalen hekken te verbuigen (Helbing, 2002). Struikelen in deze situaties van duwen en dringen is levensgevaarlijk zowel voor de persoon zelf als voor degenen die vervolgens over deze persoon heen vallen, een cascade-effect. Eenmaal gevallen is het bijna onmogelijk nog op te staan. Dit veroorzaakt veel slachtoffers. Een ander verschijnsel dat soms voorkomt bij grote menigten is een drukgolf. Als de dichtheid groot genoeg is, kan een onverwachte beweging van een klein groepje mensen heel veel mensen laten omvallen. De druk die zij kortstondig opbouwen golft door de massa en kan aan de buitenkant van die massa tot slachtoffers leiden.

Tijdens de Dodenherdenking van 2010 schreeuwde een verwarde man, waarop veel mensen angstig werden en weg wilden. De resulterende drukgolf is in [dit filmpje](#)⁸ te zien. Ook is te zien hoe mensen reageren op groepen mensen die allen in één richting bewegen; de golf zet zich namelijk voort aan de andere kant van een afgezet pad.

4.3.2.3 Alarmbellen en andere informatie

Brandalarmen worden genegeerd (Proulx, 2001). Hoewel er aandacht is voor noodsituaties door bijvoorbeeld brandoefeningen te houden, leggen de meeste mensen niet het verband brandalarm = vluchten. Dat is ook niet heel raar wanneer je in ogenschouw neemt dat de meeste brandalarmen inderdaad vals zijn of slechts dienen ter educatie –zoals bij een brandoefening. De meeste brandalarmen worden daarom juist niet geassocieerd met brand, maar met ongemak. Een onprettig geluid en een onderbreking van de werkzaamheden zijn de associaties.

Ook de aanwijzingen voor vluchtgedrag zoals bordjes nooduitgang, nooddeuren, plattegronden e.d. worden maar weinig gebruikt (Sime, 1985; Proulx, 2001; Johnson, 2005). Bij tunnelbranden vluchten mensen ook over de rijbaan in plaats van gebruik te maken van de vluchtdeuren (Boer, 2004). Het is opmerkelijk dat juist die informatie die er specifiek voor gemaakt is te assisteren in geval van nood, in die gevallen weinig gebruikt wordt.

4.3.2.4 Gedragsverandering

Mensen gaan door waar ze mee bezig waren. Het is heel moeilijk het gedrag van mensen te veranderen. Dit komt tot als eerste tot uiting in de neiging *niet* te evacueren. In de studie van (Boer, 2004) bleven de bestuurders in 85% van de gevallen in hun auto zitten; pas na expliciete oproepen om te vertrekken kwam men in beweging. Een verklaring voor dit gedrag is dat de betrokkenen te weinig informatie hebben over wat er aan de hand is. De

⁸ <http://www.youtube.com/watch?v=RrMfRSYtqII>

proefpersonen in de tunnel dachten dat het een gewone verkeersopstopping betrof –in Nederland verre van ongewoon.

Een alarmbel laat weten dat er iets aan de hand is, maar informeert niet welke reactie van het publiek gewenst is. De eerste reactie van het publiek is er daarom vaak een van afwachten tot er meer informatie beschikbaar komt. Een evacuatie zal dan moeilijk op gang komen, omdat mensen, wanneer zij omringd zijn door anderen, niet graag de eerste zijn die actie ondernemen. Proulx (1991) constateert dat extra informatie van omroepsystemen of personeel het vluchten sneller op gang kunnen brengen.

Zelfs na de beslissing te evacueren heeft men moeite niet in het oude gedragpatronen te vervallen die horen bij weggaan. Het afsluiten van de auto, uitzetten van de computer of het meenemen van bagage is verre van noodzakelijk en kan zelfs gevaarlijk zijn. Het hoort wel bij het normale gedrag dat met weggaan geassocieerd wordt. Daarom vindt het soms wel plaats.

Mensen breken soms de vlucht af om nog even een handeling te verrichten op hun startlocatie. In het experiment van Boer kwam het voor dat mensen nog hun bagage of een jas gingen pakken of de auto kwamen afsluiten. (Boer, 2004; Bryan, 2002).

Een ander voorbeeld van moeilijk te veranderen gedrag: mensen nemen vaak de route waarlangs ze gekomen zijn (Sime, 1985; Johnson, 2005). Sime bestudeerde een brand in een bar met twee uitgangen, waarvan er één een nooduitgang was. Statistische analyse liet zien dat de nabijheid en de bekendheid met de nooduitgang grote factoren zijn in de keuze van een uitgang. Mensen die bekend zijn met omgeving, bijvoorbeeld het personeel, zullen beter gebruik maken van de beschikbare (nood)uitgangen dan personen die voor de eerste keer in deze omgeving zijn. Vooral mensen die nauwelijks bekendheid hebben met de omgeving zullen evacueren via 'de bekende weg', dat is, hun aankomstroute.

Daarnaast is het zo dat nooduitgangen vaak geassocieerd worden met 'verboden' (Boer, 2007). In het dagelijks leven wordt het gebruik van nooduitgangen niet op prijs gesteld en soms zelfs bestraft. Juist in gevallen waarin informatie over de calamiteit beperkt is, kan dit ertoe leiden dat mensen geen gebruik maken van een nooduitgang. Zij lijden onder het dilemma tussen mogelijk noodzakelijk zelfbehoud en mogelijke straf voor oneigenlijk gebruik.

In het algemeen geldt dat het gedrag geleidelijk verandert van het normale gedrag naar het vluchtgedrag. Betere informatie over de aard van het gevaar kan deze overgang versnellen.

4.3.2.5 Andere waarnemingen

- Mensen zijn nieuwsgierig, gaan soms bij een gevaar staan kijken, of vluchten eerst en breken daarna de vlucht af om te kijken (Boer 2004). Boer voerde een experiment uit in een tunnel. Hij simuleerde een brandende vrachtwagen. De proefpersonen reden in auto's achter deze vrachtauto tot deze tot stilstand kwam en begon te

roken. Als mensen uiteindelijk⁹ hun auto verlieten en vluchtten, bleven zij soms staan kijken naar het schouwspel. Ramptoerisme is een bekend fenomeen; mensen zijn geïnteresseerd in het uitzonderlijke.

- Vermindering van het zicht en de gezondheid door rookgassen vermindert de loopsnelheid. (Jin, 1997). In het donker of in dikke rook neemt de loopsnelheid drastisch af. Men voorkomt hiermee dat men hard tegen een muur oploopt. Het duurt echter veel langer voor men bij de uitgang is.
- Mensen hebben een geheugen. Wanneer ze een gevaar waarnemen, blijven ze zich dat herinneren, ook als ze zich omdraaien en weglopen.
- Je bent veiliger als er een muur staat tussen jou en het gevaar. Mensen weten dit en zullen daarna handelen, dat is, een muur tussen henzelf en het gevaar proberen te krijgen door achter die muur te gaan lopen.
- De interpretatie van de situatie heeft een grote invloed op het gedrag. Brandweerlieden bijvoorbeeld, die veel ervaring hebben met branden, reageren anders dan leken. Door hun kennis van branden zullen ze de brand anders interpreteren en een veiligere vluchtroute kunnen kiezen.

4.3.3 Paniek

In tegenstelling tot wat journalisten en filmmakers willen doen geloven, komt 'paniek' nauwelijks voor. Extreem gedrag zoals het in de steek laten van eigen kinderen of partner, het verstijven van angst en blijven staan, doelloos rondrennen of letterlijk vechten voor het leven is ook extreem zeldzaam (Bryan 2002; Proulx, 1991 en 2002).

Paniek is een onduidelijke term. Grofweg kan het twee dingen betekenen.

- Een emotionele staat: hij is in paniek. Deze emotie zou ervoor zorgen dat rationeel denken moeilijker wordt.
- Het gedrag van een groep mensen, denk aan een beschrijving als: "Er brak paniek uit. Mensen renden als kippen zonder kop, verdrongen elkaar, huilden, sommigen bleven verdwaasd om zich heen kijken."

Alleen als paniek een emotionele staat is, komt het voor. Het is dan geen fundamenteel andere toestand, maar een bepaalde vorm van angst, plotseling en hevig.

De werkelijkheid is dat ontruiming en gevaar kunnen zijn en angstaanjagend voor de betrokkenen, maar dat de evacués geen asociaal of irrationeel gedrag vertonen. Wel kan het gedrag irrationeel lijken, omdat de evacués op basis van beperkte informatie hun beslissingen nemen. Maar binnen deze door de omgeving opgelegde randvoorwaarden gedraagt men zich heel rationeel.

⁹ Dit kon vrij lang duren, meestal gebeurde het pas nadat daar door een tunneloperator expliciet om gevraagd was via het omroepsysteem.

In situaties waar doden en gewonden vallen door verdrinking zoals tijdens het Heizeldrama in Brussel of de Jaramat brug¹⁰ in Mekka, hadden de slachtoffers de pech op het verkeerde moment op een plaats te zijn waar ze in de verdrinking kwamen. Zij werden het slachtoffer, omdat zij niet in staat waren te communiceren met de opdringende menigte achter hen. Deze werd ongeduldig, omdat ze niet kon doorlopen.

Dit gegeven is door hulpverleners vaak genegeerd. Zij zagen betrokkenen en omstanders vaak als slachtoffers die zo snel mogelijk geëvacueerd moesten worden. De meesten van hen zijn echter goed in staat voor zichzelf te zorgen en diegenen die niet gewond zijn, zijn wel de eerste hulpverleners die ter plekke zijn. Bij de nieuwjaarsbrand in het Hemeltje in Volendam waren omstanders en burens de eerste hulpverleners¹¹. Tegenwoordig probeert de overheid in rampenplannen deze burgers te betrekken bij de hulpverlening, maar het gevaar voor hen te beperken¹². Mankracht is namelijk altijd schaars bij grote calamiteiten, zeker in het begin.

10 Een van de onderdelen van de Hadj, de bedevaart naar Mekka, is het bekogelen met stenen van drie pilaren, die de duivel voorstellen. Tijdens de Hadj gaan jaarlijks ongeveer 2 à 3 miljoen moslims naar Mekka.

11 Bron: <http://www.ehbo.nl/Brochures/studie2204/verslag.pdf>

12 Zie bijvoorbeeld <http://www.ifv.nl/kennisplein/Documents/burgerhulp-bij-rampen.pdf>

5 Voetgangersmodellering

De eerste berekeningen over voetgangersstromen werden uitgevoerd door Predtechenskii en Milininskii (Predtechenskii, 1969). Hun boek geldt nog steeds als het standaardwerk over voetgangersgedrag en hun data zijn nog steeds een referentiepunt. De allereerste modellen voor voetgangersgedrag waren op deze data gebaseerd en beschouwden voetgangersstromen als homogene massa's. De eenheid van deze simulaties was de stroom mensen, de groep. Vanwege deze benadering worden deze modellen macroscopisch genoemd. Wanneer niet de menigte maar het individu als eenheid wordt beschouwd, spreekt men over microscopische modellen.

5.1 Macroscopische modellen

Macroscopische modellen maken gebruik van globale parameters als dichtheid, *flow* en deurcapaciteit. Als het aantal personen in een ruimte bekend is kan met behulp van het aantal deuren en de respectievelijke deurcapaciteiten de duur van de evacuatie berekend worden. Andere modellen maken gebruik van wachtrijen. Ieder stuk vloer, iedere deur en iedere trap heeft zijn eigen capaciteit. Een persoon doet er een vastgestelde tijd over om de deur of de trap te passeren. Als er meer mensen bij de deur arriveren dan er per seconde kunnen passeren ontstaat een rij.

Henderson (1974) gebruikte vergelijkingen uit de vloeistofmechanica om voetgangersstromen te beschrijven. Deze modellen kunnen een redelijk beeld geven, maar zijn onnauwkeurig met kleine lokale bewegingen zoals botsen met tegenliggers. Ook kunnen ze verschijnselen als *lane formation*, *arching* en oscillatie niet simuleren.

Een ander nadeel is dat het psychologisch wel heel simpel is. Voetgangersstromen zijn geen homogene massa's maar bestaan uit individuen met onderling grote verschillen in fysieke en psychische eigenschappen. Hierdoor vertonen mensen verschillend gedrag en kunnen bijvoorbeeld tegengestelde looprichtingen ontstaan. Macroscopische modellen kunnen dit niet simuleren. Een incorrecte aanname die bij deze modellen vaak wordt gebruikt, is dat mensen optimaal gebruik maken van de uitgangen, terwijl dit juist niet zo is (zie 4.3.2.4)

5.2 Microscopische modellen

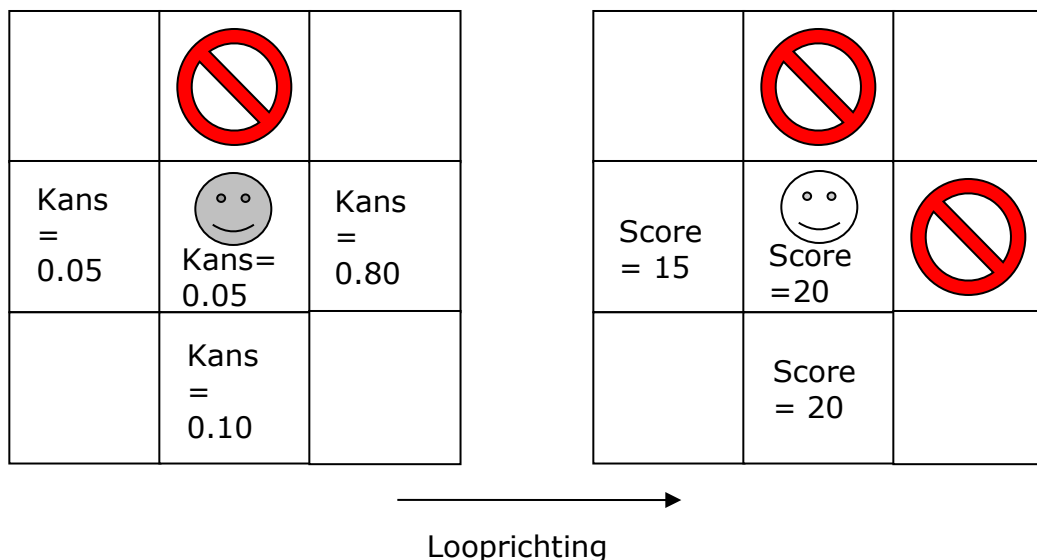
Met de ontwikkeling van de computer konden ook microscopische simulaties doorgerekend worden. Deze modellen berekenen voor iedere agent individueel zijn snelheid en richting op basis van de agent zijn omgeving. Dit vergt veel meer berekeningen, omdat de voetgangersstroom wordt opgebroken in individuen met persoonlijke eigenschappen. Een krachtige computer is dus noodzakelijk.

Een voorbeeld van een microscopisch model is het cellulaire automaten-model. Dit is onder andere beschreven door Schadscheider (2002), Tajima (2002) en Bierlaire (2003). Er bestaan grote verschillen in de complexiteit en voorspellende kracht van deze modellen. Wel zijn ze op dezelfde basisprincipes gebaseerd.

Allereerst is de ruimte discreet. De wereld wordt opgedeeld in vierkante hokjes, ook wel cellen, één agent groot. De grootte van een cel is meestal 50 cm bij 50 cm.

De naam van deze modellen is *cellulaire automaten*, omdat de ruimte in cellen is opgedeeld en de gesimuleerde personen¹³, *agents*, zich volgens enkele simpele regels automatisch bewegen. Een *floor field* of een vaste richting bepaald het doel van de agent. Bij een *floor field* krijgt iedere cel een potentiaal. De 'potentiaal' modelleert de aantrekking van de uitgang. Hoe groter de afstand tussen de cel en de uitgang, hoe hoger de potentiaal van die cel. Een agent zal proberen zijn potentiaal te verminderen. Hierdoor gaat iedere agent naar de uitgang, mits de cel met de lagere potentiaal niet bezet is. Bij simpele modellen die twee tegengestelde voetgangersstromen in een gang of bij een versmalling simuleren krijgt iedere agent een voorkeursrichting. Er zijn dan slechts naar-links-lopende en naar-rechts-lopende agents.

De manier waarop de agent over de cellen beweegt kan op verschillende manieren bepaald worden. Een mogelijkheid is dat de agent alle 8 cellen om hem heen beschouwt. Als een van de cellen een betere score geeft dan de cel waarin hij zich nu bevindt, verplaatst hij zich naar die cel. De score wordt bepaald aan de hand van omringende agents, oftewel dichtheid, potentiaal, nabijheid van muren of obstakels, nabijheid van tegenliggers en/of andere variabelen. Een andere mogelijkheid is de *biased-random walker*. Voor elke mogelijke stap die de agent kan doen wordt een kans berekend. Soms zal de biased-random walker zal soms een stap doen die hem juist verder van zijn doel brengt. Twee voorbeelden staan in Figuur 7.



Figuur 7 Een random biased walker (links) en een cellular automaton (rechts). De verbodsbordjes zijn muren of andere agents. Beide kunnen niet diagonaal bewegen. De biased walker heeft 80% kans om naar rechts te gaan. De automaton zal op zijn plaats blijven, want de score in de omringende cellen is gelijk of lager dan de cel waar hij nu in staat.

¹³ Vanaf nu zal ik altijd wanneer ik het heb over gesimuleerde mensen spreken over agents (Engels) of agenten. Dit maakt direct duidelijk of het gaat over de echte wereld of over een model of simulatie. Daarnaast zullen agents als programmeerconcept nog verder aan bod komen in 5.4.2.

Er een groot voordeel van dit model is dat het weinig rekenwerk vergt. Een computer kan vele tienduizenden agents met gemak simuleren. Het model is ook in staat *freezing by heating* en vertraging bij versmallingen te laten zien.

Een nadeel van deze modellen is dat de maximale persoonsdichtheid gelimiteerd is, door het opdelen van de ruimte in hokjes. Met cellen van 50x50 cm is de maximale dichtheid 4 personen per vierkante meter (pp/m²). In werkelijkheid kan bij extreme drukte een dichtheid van bijna 10 pp/m² bereikt worden (Still, 2000). Ongelukken door de extreme drukte kunnen hierdoor niet gesimuleerd worden.

Een ander gevolg hiervan is dat alle afmetingen in veelvoud van celafmetingen worden weergegeven. Een gang van 1,75 meter breed vertaalt zich in een 3 of 4 cellen. In het laatste geval is de doorstroming zo'n 33% groter, terwijl het om een weergave van dezelfde gang gaat. In simulaties van werkelijke gebouwen wordt deze arbitraire keuze overgelaten aan de gebruiker.

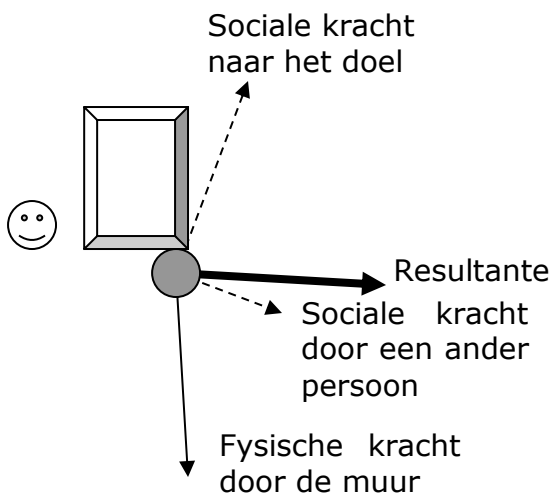
Ongewenst is ook dat de potentiaalveld doorloopt om hoeken heen. Een agent 'voelt' dus altijd de deur om de hoek; in werkelijkheid hoeft iemand dat helemaal niet te weten. In de praktijk is dat een van de redenen waarom nooduitgangen zo inefficiënt gebruikt worden.

5.2.1 Sociale-krachtenmodel

Het model dat TNO wilde gebruiken voor haar simulatiesoftware was het *social forces* model. Dit model is ontwikkeld door Helbing en onder andere beschreven in (Helbing, 1998, 2000 & 2002). Het bestaat uit de volgende componenten.

- Individuele agents: iedere agent wordt voorgesteld door een cirkel. Agents hebben een massa en karakteristieken van hun loopgedrag zitten vervat in een aantal constanten. Deze karakteristieken kunnen voor agents verschillend zijn, maar worden uit computationeel oogpunt meestal gelijk gehouden voor alle agents.
- Een 'biologische' snelheid: iedere persoon loopt met deze snelheid zolang er geen beperkende omstandigheden zijn. Deze snelheid is voor iedereen anders en hangt af van iemands fysieke gesteldheid: fitheid, kracht, beenlengte, gewicht, enz.
- Sociale krachten: iemand ondervindt een afstotende kracht wanneer hij dicht bij een persoon of obstakel komt. Deze kracht is afhankelijk van het verschil in snelheid en richting en neemt exponentieel af met de afstand. Dit is gebaseerd op de persoonlijke ruimte, de ruimte die een mens bewaart tot de andere mensen om hem heen. Mensen voelen zich minder op hun gemak wanneer anderen te dichtbij komen.
- Fysische krachten: wanneer het lichaam van een persoon contact maakt met een ander lichaam of een muur, ondervindt hij de sterke reactiekracht hiervan. Ook ontstaat er dan een wrijvingskracht; deze is afhankelijk van het onderlinge snelheids- en richtingsverschil.

- Andere sociale krachten die de omgeving uitoefent op een persoon. Een etalageruit trekt mensen aan, een brand stoot mensen af. Een object in de omgeving dat een dergelijke kracht uitoefent, noemen we een *attractor*. Helbing werkt dit niet uit en maakt er in zijn simulaties nauwelijks gebruik van.
- Kuddegedrag: mensen volgen anderen. Een menigte heeft een gemiddelde richting; het individu is meer of minder geneigd deze richting over te nemen, afhankelijk van zijn "paniekfactor" (Helbing, 2000). Bij een hogere paniekfactor neemt het individu deze richting sneller over. De term 'paniek' heeft als nadeel de associaties met irrationeel asociaal gedrag. Bij TNO is daarom voor de neutralere term 'dreigingsbesef' gekozen. Ik kom terug op dreigingsbesef en kuddegedrag in 5.2.3 en 5.3.2.



Figuur 8 Een visuele weergave van de belangrijkste krachten in het sociale-krachtenmodel. De gewenste looprichting en –snelheid worden weergegeven als een kracht.

5.2.2 Formulering

De wiskundige formulering is als volgt:

$$m_i \frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial t} = m_i \frac{v_i^0(t) \mathbf{e}_i^0(t) - \mathbf{v}_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j(\neq i)} \mathbf{f}_{ij} + \sum_W \mathbf{f}_{iW}$$

Formule 1 De centrale formule van het social forces model. Alle vectoren zijn vetgedrukt.

m_i is de massa van het de agent (in kg)

$v_i^0(t)$ is de gewenste snelheid waarmee de agent wil lopen (in m/s)

$\mathbf{e}_i^0(t)$ is de gewenste richting waarin de agent wil lopen

$\mathbf{v}_i(t)$ is de huidige snelheidsvector¹⁴ van de agent (in m/s)

τ_i is de vertragingsfactor (in seconden)

$\sum_{j(\neq i)} \mathbf{f}_{ij}$ is de som van alle krachten van alle andere agents (in Newton)

$\sum_W \mathbf{f}_{iW}$ is de som van alle krachten van muren en obstakels (in Newton)

Wanneer de versnelling $\frac{\partial v_i}{\partial t}$ kan worden uitgerekend, kunnen de snelheid en de plaats met afgeleiden berekend worden.

Als er een verschil bestaat tussen de gewenste snelheid en/of richting waarin de agent loopt is het bovenste gedeelte van de tweede breuk in Formule 1 geen nul meer. De versnelling wordt vermenigvuldigd met de massa van de agent. Hierdoor ontstaat een kracht die op alle agents hetzelfde effect heeft, ongeacht hun massa. Een zware agent zal net zo sterk getrokken worden naar zijn gewenste snelheid en richting als een lichte agent.

Als er geen andere agents of muren zijn, zal de agent binnen τ_i seconden de gewenste snelheid en richting bereikt hebben. Alleen krachten van andere agents of muren kunnen hem daarvan weerhouden. Dit is een redelijke aanname, mensen kunnen vrijwel direct stoppen of wandeltempo bereiken. Ook draaien kost bij lage snelheden omstreeks een halve seconde.

De kracht die een agent j uitoefent op een agent i wordt gegeven door

$$\mathbf{f}_{ij} = \left\{ A_i \frac{r_{ij} - d_{ij}}{B_i} + kg(r_{ij} - d_{ij}) \right\} \mathbf{n}_{ij} + \mathcal{K}g(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ji}^t \mathbf{t}_{ij}$$

Formule 2 De kracht tussen twee agents wordt gegeven door deze formule. Vectors zijn vetgedrukt.

A_i ; B_i ; k en \mathcal{K} zijn constanten. Helbing (2000) houdt voor de constanten de volgende waarden aan: $A = 2000$ Newton; $B = 0.08$ meter; $k = 120.000$ kg/s² en $\mathcal{K} = 240.000$ kg/ms.

$r_{ij} = r_i + r_j$ is de som van de stralen van de agenten i en j (in meter)

$d_{ij} = \|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j\|$ is de afstand tussen de middens van deze agenten (in meter)

$\mathbf{n}_{ij} = (n_{ij}^1, n_{ij}^2) = \frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j}{d_{ij}}$ is de normaalvector¹⁵ agent j naar agent i

¹⁴ De snelheidsvector voegt snelheid en richting samen. Het staat voor een snelheid in een richting.

¹⁵ Een normaalvector heeft een lengte van 1. Bij vermenigvuldiging met een snelheid ontstaat een snelheidsvector die een snelheid in een bepaalde richting voorstelt.

$\mathbf{t}_{ij} = (-n_{ij}^2, n_{ij}^1)$ is de tangentiële richting van beide agenten. Deze richting maakt een hoek van 90° met \mathbf{n}_{ij} .

$\Delta v_{ji}^t = (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \mathbf{t}_{ij}$ is het tangentieel snelheidsverschil (in m/s). Twee personen die recht op elkaar af lopen hebben geen tangentieel snelheidsverschil. Hoe groter de hoek tussen beide agents, hoe groter het verschil.

$g(x)$ is een functie die 0 is als $x < 0$. Dat gebeurt wanneer de agents elkaar niet raken, dan is $(r_{ij} - d_{ij}) < 0$. Als de agents elkaar raken, is $g(x)$ de waarde van het argument x . Dit betekent dat de termen met de functie $g(x)$ erin pas een rol spelen als twee agents elkaar raken; anders zijn deze termen nul.

De eerste term van Formule 2 is de sociale kracht; deze hangt af van de afstand tussen twee agents. De tweede term drijft twee agents met grote kracht uit elkaar áls zij elkaar raken en staat voor de elasticiteit van het menselijk lichaam. Beide krachten zijn altijd van de agent j af. De derde term geldt ook alleen als ze elkaar raken, maar nu is de kracht loodrecht gericht op de richting van agent j naar agent i . Dit is de frictiekracht die bij langs elkaar glijden afremt.

De kracht van een muur op agent i is vrijwel gelijk aan Formule 2

$$\mathbf{f}_{iW} = \left\{ A_i \frac{r_i - d_{iW}}{B_i} + kg(r_i - d_{iW}) \right\} \mathbf{n}_{iW} + \kappa g(r_i - d_{iW}) (\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{t}_{iW}) \mathbf{t}_{iW}$$

Formule 3 De kracht van een muur op agent i .

Het verschil zit erin dat de elasticiteits- en frictiekracht in werking treden als het lichaam van agent i overlapt met een muur. Een muur heeft geen radius, daarom is alleen de radius van de agent van belang. De derde term ziet er anders uit, maar is rekenkundig hetzelfde. Een muur beweegt sowieso niet en dat maakt een simpeler notatie mogelijk.

Helbings model kan de lokale beweging van mensen goed simuleren. Mensen botsen niet met anderen en lopen niet opeengepakt als er genoeg ruimte is. Mensen botsen niet tegen muren of obstakels; ze houden liefst wat afstand tot obstakels om vrij te kunnen bewegen. Mensen gaan langzamer lopen naarmate de afstand tot een obstakel kleiner wordt.

Het sociale-krachtenmodel is een goed model om simulatiesoftware mee te maken. De redenen daarvoor zijn:

- Het geeft een goede modellering van het menselijke loopgedrag.
- Het is een bekend model met een goede reputatie.

- Het is *public domain* en kan gebruikt worden zonder dat rechten verschuldigd zijn.
- Het is simpel te implementeren, omdat het loopgedrag slechts met vijf componenten wordt beschreven.
- Het perspectief van deze componenten is steeds de mens zelf. De persoon gebruikt geen kennis die hij niet kan hebben –zoals de dichtheid van personen achter hem. De agents van Helbing zijn als aparte individuen gemodelleerd. Iedere agent heeft unieke psychische en fysieke eigenschappen (zoals lichaamsomvang, biologische snelheid, maximale loopsnelheid).
- Deze vijf componenten zijn voldoende om het loopgedrag in een groot aantal situaties te modelleren; met weinig regels verklaart het model veel; daarmee voldoet het aan het principe van spaarzaamheid. Helbings model genereert allerlei verschijnselen zonder dat deze expliciet worden beschreven (Helbing, 1998); het verschijnsel duikt opeens op. Een dergelijk emergent verschijnsel is de vertraging bij een deur. De deur is smal, daardoor komt de agent dicht bij de muur. Hierdoor ondervindt hij een afstotende kracht en daardoor neemt de loopsnelheid af. De deur wordt zonder extra parameters een vertragende factor.

5.2.3 Paniekfactor

In (Helbing, 2000) wordt de paniekfactor p_i gedefinieerd als een getal tussen 0 en 1. Deze factor speelt een rol in het vaststellen van v^0 en e^0 :

$$v_i^0(t) = [1 - p_i(t)]v_i^0(0) + p_i(t)v_i^{\max}$$

Formule 4 Paniekfactor in relatie tot gewenste loopsnelheid.

v_i^{\max} is de maximale loopsnelheid voor agent i . Als p nadert aan 1, zullen de agents met hun maximale loopsnelheid proberen te lopen. Is p daarentegen klein, dan proberen de agents met hun gewenste snelheid te lopen.

$$e_i^0(t) = \text{norm} \left\{ (1 - p_i) e_i + p_i [e_j(t)]_i \right\}$$

Formule 5 Paniekfactor in relatie tot gewenste loopricting.

$\text{norm}(x) = \frac{x}{\|x\|}$ berekent de normaalvector van een willekeurige vector.

e_j is de gemiddelde loopricting van de agents j binnen een bepaalde afstand R ; Helbing (2000) gebruikt $R = 5$ meter.

Als p toeneemt zal de agents gewenste ricting meer en meer gaan afhangen van de mensen om hem heen. Het kuddegedrag neemt dan toe.

Deze regel lijkt erg op soortgelijke regels die worden gebruikt voor het simuleren van zwermgedrag van vogels of vissen. Het is gebleken dat met drie

relatief simpele regels dit complexe gedrag beschreven kan worden. Voor een vogel zijn die drie regels kortweg A) blijf bij de anderen B) maar bots er niet mee en C) vlieg in de gemiddelde richting met de gemiddelde snelheid van de dieren om je heen (Reynolds, 1987).

Simulaties van deze parameter laten zien dat in een ruimte waar de uitgangen niet bekend zijn aan de agents de snelste ontruimingstijden worden behaald met $p=0,4$. Bij lagere waarden moet iedere agent de uitgang zelf vinden, bij hogere waarden gebruiken bijna alle agents dezelfde uitgang, wat voor vertragingen zorgt (Helbing, 2000).

5.3 Uitbreidingen

Het social forces model van Helbing veronderstelt geen intelligentie van de agents. Hun gedrag wordt bepaald door externe factoren en de agent zelf heeft er geen bewuste invloed op. Om simpel gedrag te modelleren is dit voldoende.

Helbings model is een goede basis voor een simulatie, maar moet aangevuld worden. Helbings agents beginnen met een willekeurige snelheid en richting, terwijl mensen in werkelijkheid een bepaald doel nastreven. Een doel dat zij op rationele wijze bepaald hebben en alleen zichzelf kunnen veranderen, bijvoorbeeld als de omstandigheden daarom vragen. Daarnaast laten mensen zich leiden door hun emoties. Bij evacuaties zijn vooral angst en verbondenheid met anderen van belang. Voor het model dat gebruikt gaat worden in de softwaretoepassing FFFSim zijn extra componenten nodig.

Deze extra componenten zijn:

- Agents hebben een doel. Dit doel kan bijvoorbeeld 'vluchten' zijn of 'afwachten' of 'naar perron 7 lopen'. Uit dit doel volgt in een plaats in de ruimte waar de agent naar toe wil. Zonder obstakels of invloeden van andere agents neemt de agent de kortst mogelijke weg.
- Agents hebben intelligentie. De agent bepaalt zijn doel aan de hand van zijn kennis en waarnemingen. De agent kan van doel veranderen naar aanleiding van nieuwe waarnemingen. Ook is een geheugen noodzakelijk (Lakoba, 2003).
- Agents hebben een dreigingsbesef. De agent bepaalt aan de hand van deze parameter of hij zal vluchten.
- Agents behoren tot een groep en zullen bij die groep proberen te blijven (Sime, 1985).

De agents hebben een doel en de intelligentie om van doel te veranderen. De omslag van initieel naar vluchtgedrag is van groot belang. Deze wordt gemodelleerd met een beslismodule. Deze module gaat later ook een grote rol spelen bij de simulatie van rellen; ook hier dient een cognitief proces gesimuleerd te worden. De module is voortdurend actief maar heeft pas zichtbaar effect als er een drempelwaarde overschreden wordt. Tot die tijd wordt initieel gedrag vertoond.

5.3.1 Initieel gedrag

Voor een reële simulatie is het noodzakelijk ook het gedrag voorafgaand aan de noodsituatie te kennen. Allereerst omdat mensen geneigd zijn hun normale gedrag zo lang mogelijk te continueren. Het initiële gedrag bepaalt

waar iemand naar toe loopt op het moment van het ontstaan van de noodsituatie en is daarom dus erg belangrijk. Voor een goede simulatie van initieel gedrag zijn naast positie eveneens de loopsnelheid en -richting van belang.

Positie: de verdeling van mensen over de ruimte is afhankelijk van de omgeving. Op stations is het op sommige perrons veel drukker dan op andere, omdat er net een trein is gearriveerd. In een file auto's is de dichtheid van personen ten opzichte van het drukke station laag en bovendien erg regelmatig.

Loopsnelheid: op een station proberen veel mensen gehaast hun aansluiting te halen, terwijl men in een winkelstraat langzaam langs de etalages slentert. De loopsnelheid kan ook nul zijn, als mensen slapen in een hotel of kijken naar een film in de bioscoop.

Looprichting: deze hangt af van het doel van de loopactie. In sommige situaties verschillen doelen en daarmee de looprichtingen erg: op kantoor of in een warehouse loopt een ieder naar verschillende plaatsen. In andere situaties zijn het doel en de daaruit voortvloeiende richting voor iedereen gelijk, bijvoorbeeld bij het toestromen naar een evenement of bij het meelopen in een protestdemonstratie.

Gedurende de initiële fase is er nauwelijks kuddegedrag; iedere agent loopt volgens zijn eigen doel en trekt zich weinig aan van wat anderen doen. Pas wanneer het dreigingsbesef sterk stijgt, speelt kuddegedrag een rol.

5.3.2 Dreigingsbesef

Wanneer er gevaar dreigt, slaan mensen op de vlucht. In FFFSim simuleren we de overgang van initieel gedrag naar vluchtgedrag. Dit heeft een duidelijke meerwaarde. Uit casestudies van ontruiming bij branden (Boer, 2004; Bryan, 2002; Proulx, 1991, 2001 & 2002) blijkt dat veel mensen in eerste instantie niet op de vlucht slaan, omdat zij geen dreiging ervaren. Ze continueren hun initiële gedrag. Vluchten tijdens de eerste minuten na het ontstaan van een brand is van levensbelang, want op dat moment kan dit vaak nog veilig. Als langer gewacht wordt, groeit de brand en verspreidt de rook zich over de vluchtroutes. Hierdoor daalt de overlevingskans.

Wettelijke regelingen vereisen dat gebouwen en schepen binnen een bepaalde tijd ontruimd moeten kunnen zijn. Binnen het kader van de scheepsveiligheid wordt gesproken over *awareness*, *travel*, *embarkation* en *launching time*. *Awareness time* is de tijd tussen het eerste signaal dat er iets mis is, bijvoorbeeld een alarm, en het moment waarop de vlucht wordt aangevangen. De *travel time* is de tijd die nodig is om naar de plek te komen waar men kan overstappen op een reddingsboot. *Embarkation* en *launching time* zijn respectievelijk de tijd om in de boot te komen en de tijd om de boot in het water te krijgen (International Maritime Organization, 1999).

Als men wacht met vluchten, tikt kostbare tijd weg. Bestaande modellen simuleren de omslag van initieel naar vluchtgedrag niet en missen daarom een goede modellering van de *awareness time*. Hooguit werken ze met een constante vertraging van enkele minuten voordat het vluchten aanvangt (Meeussen, 2004). In FFFSim modelleren we de omslag van initieel naar vluchtgedrag wel, om de voorspellende waarde van het model te vergroten.

De beslissing op de vlucht te slaan moet dus worden gemodelleerd. Deze beslissing past niet direct in het social forces model. Een beslissing is immers geen kracht. Een beslissing kan echter wel een consequentie krijgen in de vorm van de plaats waar de agent naar toe wil. Wanneer de agent besluit te vluchten, verandert de plaats en daarmee de richting waarin de agent wil lopen. Een beslismodule om het doel te bepalen is dus noodzakelijk.

Om de overgang naar vluchtgedrag te modelleren krijgt ieder agent in FFFSim een parameter 'dreigingsbesef' met bijbehorende drempelwaarde. Deze parameter representeert psychologische concepten zoals angst, besef van gevaar of 'de mate van het zich veilig voelen'. Ter wille van de eenvoud modelleren we slechts met alleen deze parameter en zijn drempelwaarde de emotionele toestand van een mens. Het dreigingsbesef is de enige psychische parameter die variabel is; hij verandert dus onder invloed van de omgeving. Het dreigingsbesef dicteert de verandering van loopgedrag door een noodsituatie. Iedere agent heeft een persoonlijk dreigingsbesef. Wanneer uiteindelijk het dreigingsbesef boven de drempelwaarde komt, verandert het doel van de agent van gewoon, alledaags (initieel) naar vluchten.

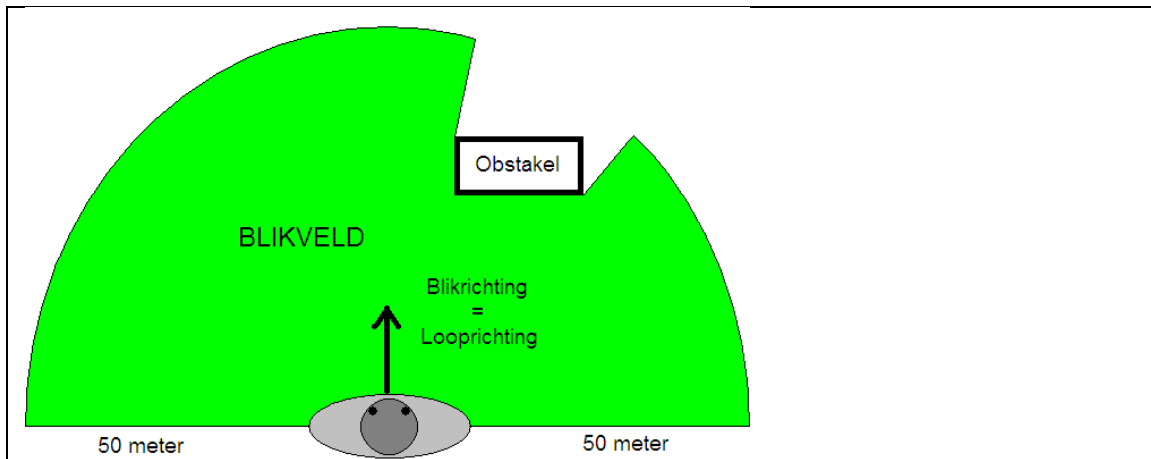
Het dreigingsbesef van een agent hangt af van de volgende parameters:

- De waarneming van een gekwantificeerd "objectief" gevaar in de gesimuleerde wereld, bijvoorbeeld "Gevaar=30".
- De waarneming van een autonome ontwikkeling van dat gevaar over de tijd (het stijgt met 0.2 punt/s, of verdubbelt elke 5 minuten). Wanneer het gevaar zich niet langer uitbreidt, daalt het dreigingsbesef langzaam; er treedt gewenning op.
- Obstakels tussen de agent en het gevaar. Deze bieden bescherming en doen het dreigingsbesef dalen.
- Indirecte waarneming van andere agents. Een agent 'ziet' het dreigingsbesef van anderen en past zijn eigen dreigingsbesef aan aan het gemiddelde van de groep. Op deze wijze simuleren we non-verbale communicatie tussen mensen: het waarnemen van een gezichtsuitdrukking en houding.
- Alarmsignalen. Als er alarmbellen rinkelen, stijgt het dreigingsbesef.
- Persoonlijkheid. Iedere agent weegt zijn waarnemingen weer anders af. Ten eerste zijn er stoere machotypes die gevaar bagatelliseren en bangeriken die het overdrijven. Ten tweede speelt deskundigheid een rol: ervaren brandweerlieden zien eerder gevaar dan leken.
- Lichtuitval en lichtdemping door rook. Donkerte doet het dreigingsbesef stijgen.
- Direct contact met het gevaar door hittestraling of irritatie van luchtwegen door rook. Het dreigingsbesef neemt dan sterk toe.

In werkelijkheid is er nog een tussenfase van oriëntatiegedrag waarin men onzeker is over het gevaar. Mensen wachten af, maar proberen vooral meer informatie te krijgen over het gevaar. Vooralsnog zal FFFSim zo'n oriëntatiefase niet modelleren. Ten dele omdat oriëntatiegedrag moeilijk te formaliseren is, namelijk het zoeken naar iets waarvan je niet weet of het er is. Ten dele omdat de afstand die mensen in deze fase afleggen niet erg groot is en daardoor weinig invloed heeft op de locatie van waar het vluchten aanvangt. We willen in een later stadium deze fase wel modelleren, omdat

tijdens deze fase wel extra informatie over het gevaar wordt verkregen; dit beïnvloedt de beslissing op de vlucht te slaan.

5.3.3 Blickveld



Figuur 9 Het blikveld heeft een hoek van 180° en strekt zich uit over 50 meter. Obstakels nemen een deel van het zicht weg(niet op schaal).

Belangrijk voor het dreigingsbesef is het blikveld, het gebied dat mensen kunnen zien. Dit bepaalt immers in grote mate de waarneming en de waarneming bepaalt het gedrag. Als een agent een gevaar zelf waarneemt, stijgt het dreigingsbesef veel meer dan wanneer hij dit moet afleiden uit het gedrag van anderen. De toevoeging van een blikveld aan agents maakt FFSim reëler.

We nemen aan dat de richting van het blikveld, blikrichting, hetzelfde is als de looprichting. Dus mensen kijken altijd in dezelfde richting als ze lopen en vice versa. Ook als de loopsnelheid nul is, hebben mensen een blikrichting; te denken valt aan een tribunevak bij een voetbalwedstrijd of automobilisten in een file. In het initiële gedrag moet onderscheid gemaakt worden tussen een willekeurige of collectieve blikrichting.

Mensen hebben een zichthoek van ongeveer 220°, maar in de uiterste hoeken is slechts een beperkt zicht mogelijk. Wij gebruiken een zichthoek van 180°, omdat dit mathematisch gemakkelijker is. We verwachten dat dit een verwaarloosbare invloed heeft op het gedrag van de agent. De afstand waarover agents kunnen zien, is 50 meter. Deze afstand wordt kleiner onder invloed van rook. Uiteraard kunnen agents niet door muren heen kijken.

5.4 Simulaties

5.4.1 Bestaande simulaties

Er bestaan al enkele voetgangerssimulatieprogramma's. Ze zijn op verschillende technieken gebaseerd en gebruiken verschillende onderliggende modellen om het voetgangersgedrag te voorspellen.

EVACNET4 (Kisko, 1998) is een *flow-based* model. Elke kamer en gang is een knoop in een *grid*¹⁶. Iedere knoop kan een maximaal aantal agents bevatten. Om van de ene knoop naar een andere te komen moet er tussen beide knopen een verbinding aanwezig zijn. Deze verbinding heeft een bepaalde capaciteit. EVACNET4 kan, gegeven een zo'n netwerk, de optimale evacuatiestrategie bepalen. Hierbij wordt geen rekening gehouden met sociale factoren of de invloed van de omgeving op agents.

Pedflow (Kukla, 2003) maakt gebruik van een *grid* maar is toch geen cellulaire automaten simulatie, omdat de agents over meerdere cellen vooruit kunnen kijken. Ook kunnen de agents in koppels lopen. Mensen lopen vaak in groepen van twee. Pedflow heeft algoritmen om dit gedrag te kunnen simuleren. Pedflow en EVACNET4 zijn beide ingehaald door de tijd. Met de opkomst van de computer werd het mogelijk simulaties steeds uitgebreider en complexer te maken.

EXODUS is daar een voorbeeld van, onder andere beschreven in (Galea, 2000). Deze ook commercieel succesvolle simulator heeft drie versies, één voor gebouwen *buildingEXODUS*, één voor vliegtuigen *airEXODUS* en één voor schepen *marineEXODUS*. EXODUS deelt de ruimte op in cellen van een halve meter in het vierkant. Van iedere agent kunnen heel veel parameters worden ingesteld zoals de kennis van de omgeving, de invloed van rook op de loopsnelheid, de leeftijd etc. Hierdoor kunnen goede resultaten bereikt worden, maar degene die de instellingen invoert, kan daarmee de resultaten beïnvloeden. Dit moet dus zeer nauwkeurig en weloverwogen gebeuren (Meeussen, 2004).

Simwalk¹⁷ is een puur commerciële simulator die ook gebruikt maakt van het sociale-krachtenmodel. De inzage in dit model is echter gering, omdat alleen op de site van het bedrijf informatie te vinden is.

5.4.2 Agents

Het schrijven van software heeft in de geschiedenis een aantal stadia doorlopen. De eerste computers werden nog geprogrammeerd door hardware op de juiste manier te schakelen. Dat was nogal omslachtig. De eerste programmeertalen waren in machinecode; hierbij schrijf je direct de instructies voor de processor. Ook dit is nog steeds erg tijdrovend; een abstractere manier was gewenst. Zo ontstond het imperatief programmeren. Hierbij worden instructies nog steeds na elkaar gegeven, maar op een veel hoger niveau. Voor het maken van complexe en grote programma's met duizenden regels code is deze methode niet intuïtief genoeg, de programmeurs raken het overzicht kwijt.

Daarom werd object georiënteerd programmeren ontwikkeld. Dit is het paradigma waarmee tegenwoordig de meeste software in geschreven wordt. Hierin wordt een programma geschreven aan de hand van het idee dat objecten bepaalde eigenschappen hebben en functie kunnen vervullen. Het object auto heeft als eigenschap de kleur rood en kan van A naar B rijden.

¹⁶ Een grid is een soort net; de agents kunnen zich alleen op de knopen bevinden en alleen via verbindingen tussen de knopen verplaatsen.

¹⁷ www.simwalk.com

Met dit paradigma ontstaat een wereld van objecten. Hoe deze objecten met elkaar interacteren is echter niet intuïtief duidelijk. De volgende stap in de ontwikkeling van het programmeren verhelpt dit probleem: agents. Agents zijn stukken software met hun eigen doelen (desires). Om hun doel te bereiken gebruiken de agents de objecten van het object georiënteerd programmeren. Agents kunnen meerdere doelen hebben en hebben hun eigen beeld van de werkelijkheid (beliefs). Op basis van hun doelen en beliefs maken ze een plan (intention) om hun doel te bereiken. Dit is het BDI-framework: Beliefs, Desires en Intentions.

Er zijn intussen veel verschillende agent platformen ontwikkeld, ieder met zijn eigen specialismen. Denk bijvoorbeeld aan agents die onderling kunnen communiceren, of juist webpagina's kunnen lezen. Agents die controletaken uitvoeren of juist kunnen onderhandelen. Voor FFFSim is gebruik gemaakt van 3APL.

5.4.3 3APL

3APL wordt uitgesproken als trippel – ee – pie – el; het is een afkorting van AAAPL wat staat voor An Abstract Agent Programming Language. 3APL bouwt voort op de paradigma's van het imperatief programmeren en het logisch programmeren.

Imperatief programmeren als structuur van een computerprogramma is de gedachte dat de software de computer vertelt welke bewerkingen hij moet uitvoeren. "Doe dit en doe dan dat." Dit is de meest gebruikte vorm van programmeren. De talen C, C++ en java zijn allemaal gebaseerd op dit principe.

Logisch programmeren daarentegen is gebaseerd op de gedachte dat als je de feiten en regels in de wereld goed beschrijft, je daarna de computer kunt vragen of iets in die wereld waar is of niet. Vanwege deze beschrijving van de wereld wordt logisch programmeren gezien als een declaratieve programmeertaal. Prolog is een programmeertaal die hierop gebaseerd is.

Wat beide paradigma's missen is een kennisstructuur die gebaseerd is op de menselijke kennisverwerking. Mensen hebben hun overtuigingen, wensen en intenties: BDI. 3APL verbindt beide concepten en maakt het redeneren met BDI mogelijk.

3APL is geschreven in java en maakt gebruik van de prolog-engine JIProlog, een java-implementatie van deze taal.

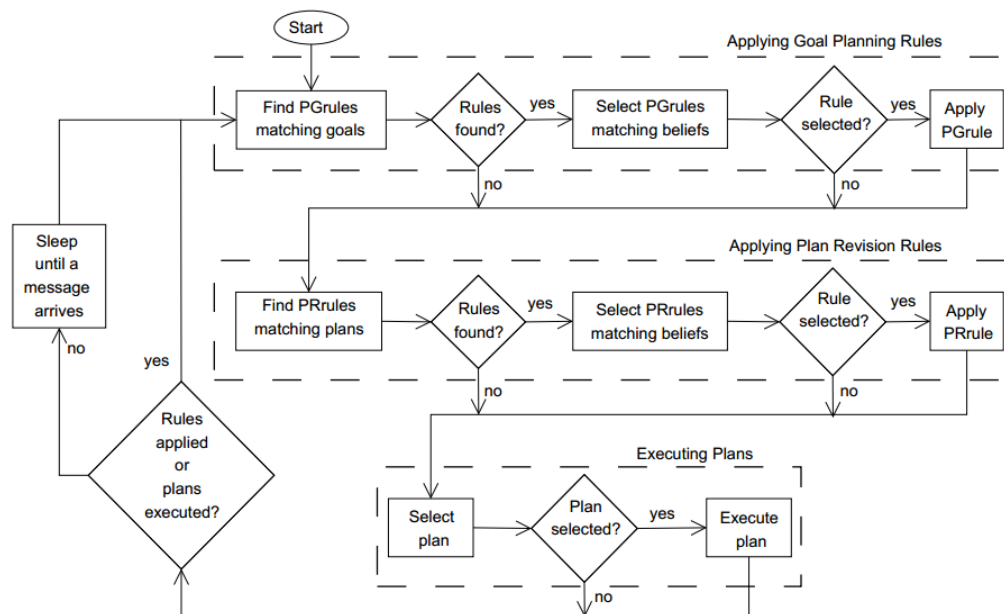
5.4.3.1 De redeneercyclus van 3APL

3APL doorloopt constant dezelfde cyclus om de doelen en plannen te bepalen en daarna acties uit te voeren. Deze cyclus is hieronder weergegeven.

De eerste stap in de cyclus is het bepalen van een doel. Dit gebeurt op basis van de Goal Planning Rules en de set beliefs. Als er een regel gevonden wordt dit toegepast kan worden, wordt deze regel uitgevoerd. De volgende stap is het maken van een plan. Hierbij worden de Plan Revision Rules gebruikt. Dit zijn dus andere regels dan voor het maken van een Goal ingezet worden. Zodra een toepasbare Plan Revision Rule wordt gevonden, wordt deze uitgevoerd. De laatste stap in de cyclus is het uitvoeren van het geselecteerde plan. Mocht er tijdens de voorgaande 3 stappen geen enkele regel toegepast

of plan uitgevoerd zijn, dan wacht de agent totdat er een nieuw bericht binnenkomt; op basis van de huidige set regels en beliefs is geen verandering mogelijk.

The cyclic interpreter (deliberation cycle) for 3APL agents



Figuur 10 De deliberatie cyclus van 3APL¹⁸

Als voorbeeld¹⁹ een 3APL-programma waarin een agent als doel heeft een doos van kamer2 naar kamer1 te verhuizen. Om dat te bereiken moet hij eerst naar de juiste kamer toe.

```
PROGRAM "transport"
CAPABILITIES{
{ pos(P) } Goto(R) { NOT pos(P) , pos(R) },
{ pos(P1) AND box(P1) } Movebox(P1,P2) { NOT pos(P1),NOT box(P1) , pos(P2) , box(P2) },
{ TRUE } Transported() { transport() } }

BELIEFBASE{ dest(room1). box(room2). pos(room3). }
GOALBASE{ transport() }
PLANBASE{ }
PG-RULES{ transport() <- box(Room) AND dest(Dest) | { Goto(Room); Movebox(Room, Dest);
if box(Dest) then Transported() } }
```

5.4.4 FFFSIM

FFFSim is geprogrammeerd in python. Python is een programmeertaal met een hoog abstractieniveau die voor heel veel toepassingen geschikt is. Met Python kan zowel met het imperatieve als het object-georiënteerde en functionele paradigma gewerkt worden.

¹⁸ <http://www.cs.uu.nl/3apl/deliberationcycle.pdf>

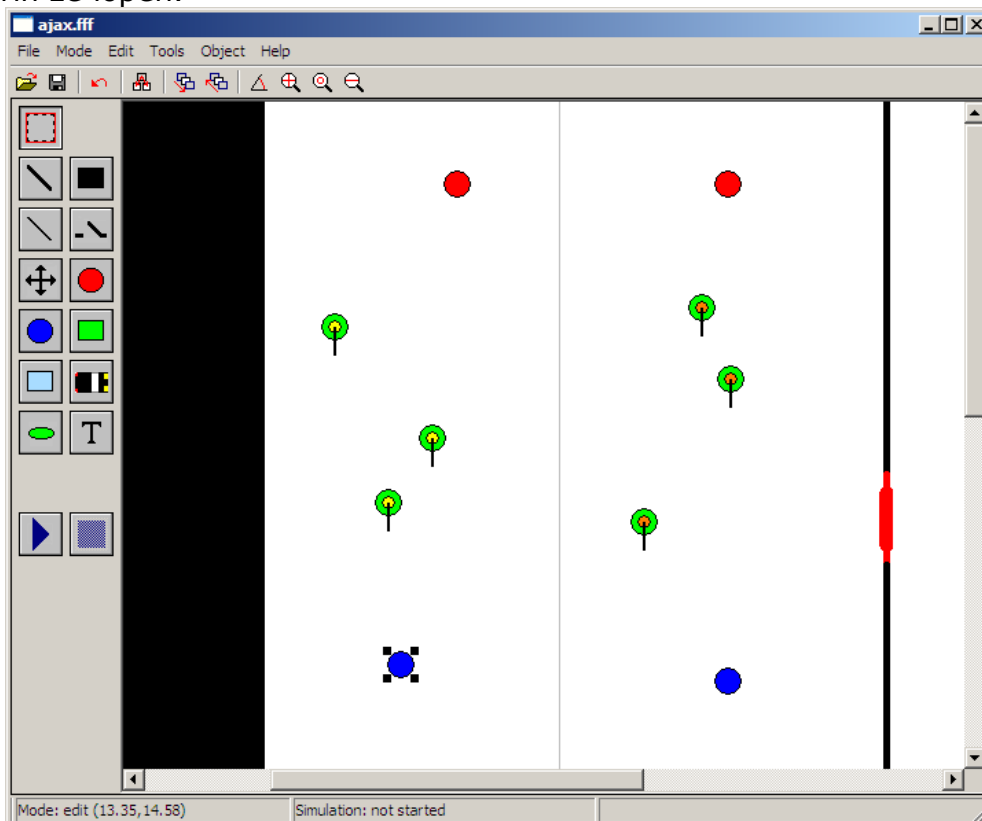
¹⁹ Versimpeld naar <http://www.cs.uu.nl/3apl/download/java/userguide.pdf>, 5.1.1

3APL is geschreven voor prolog. Om 3APL te gebruiken met python is dus een interpreter nodig die het prologframework kan verwerken in python. Daarnaast moet de 3APL-code vertaald kunnen worden naar prolog. De parser die dit kan moet dus ook beschikbaar zijn. Deze interpreter en parser zijn beide door TNO zelf ontwikkeld, specifiek voor dit project. Het agentmanagement system Spyse wordt gebruikt om de communicatie tussen meerdere agents mogelijk temaken.

Een multi-agent systeem wil zeggen dat in FFFsim meerdere agents tegelijk hun gedrag uitvoeren. Ze hoeven dus niet op elkaar te wachten wanneer er één een lange redenering moet uitvoeren. Een *agent management system* (AMS) verdeelt de processortijd over de agents en laat hen met elkaar communiceren waar nodig. Ook de omgeving, *environment*, en de user-interface, *GUI*, zijn agents, net als de gesimuleerde mensen. Het gedrag van de environmentagent is de plaats, snelheid en dergelijke van alle muren en agents bijhouden; het is aan de GUI om deze op het scherm te vertonen

Voor de visuele output wordt gebruik gemaakt van WxWidgets, een softwarebibliotheek waarmee een grafische user interface kan worden gecreëerd. WxWidgets is geschreven in C++, maar door gebruik te maken van de *wrapper* WxPython, is WxWidgets ook in python beschikbaar.

FFFSim laat een bovenaanzicht van de wereld zien in 2 dimensies. Muren en gebouwen zijn dus respectievelijk lijnen en rechthoeken. Mensen worden weergegeven als cirkels; uit de cirkel steekt een lijntje dat de loop- en kijkrichting aangeeft. De agents kijken dus altijd recht vooruit in de richting waarin ze lopen.



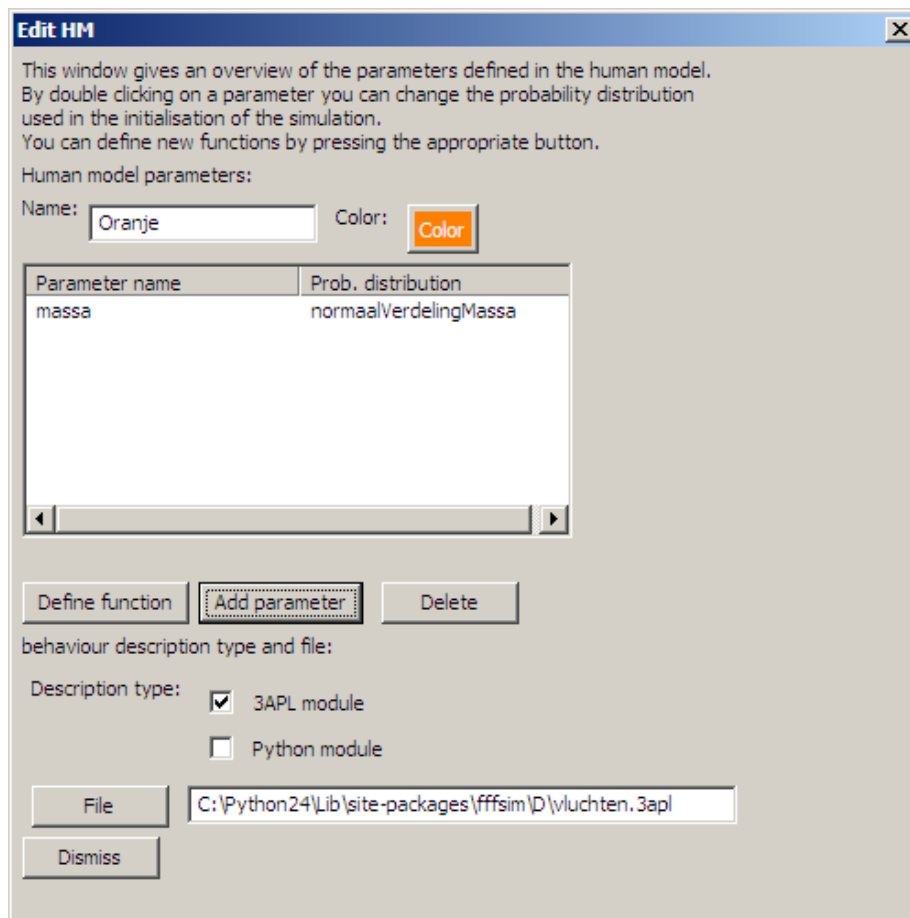
Figuur 11 Het venster FFFsim. De file ajax.fff is geladen. De omgeving wordt getoond. Zwarte lijnen en vlakken zijn muren, grijze lijnen zijn hekken; een persoon kan door een hek heen kijken, door een muur niet. In de muur rechts zit een deur (rood). De rode cirkels zijn gevaren, de blauwe zijn doel-

punten; het linker doel-punt is geselecteerd. Groene cirkels zijn personen, het kleine cirkeltje in het midden geeft aan tot welk HumanModel ze behoren (geel of oranje). Het streepje aan de persoon geeft de kijk- en looprichting weer.

5.4.4.1 Mensmodel en groep

Iedere agent behoort tot een groep, HumanModel. De leden van een groep gebruiken allemaal hetzelfde 3APL-bestand en daarmee dezelfde redeneerregels en initiële Beliefs. Bij evacuatie is er meestal maar één groep met één mensmodel; bij crowd and riot control zijn er meerdere groepen, bijvoorbeeld Club 1, Club 2 en Politie. Het mensmodel voor de eerste twee groepen is supporter en politieagent voor de laatste. Het gedrag van deze groepen zal dus verschillen.

In het venster FFFsim heeft iedere groep zijn eigen kleur. In Figuur 11 zijn er twee groepen: geel en oranje.



Figuur 12: Het menu 'Edit HM'. Naam en kleur van dit Human Model kunnen worden ingesteld. De parameter massa is gedefinieerd door de functie normaalVerdelingMassa. Het redeneren van deze agent gebeurt met de regels uit het bestand vluchten.3apl.

5.4.5 Uitwerking van formules

De voorgaande hoofdstukken hebben al een goed beeld gegeven van de formules waar FFFSim mee moet werken. Al is naar sommige slechts gehint. Hieronder volgt een opsomming van alle gebruikte formules en computercode

die het gedrag van de agents bepalen. Daarnaast zal ik kort de redenen bespreken waarom sommige eigenschappen niet zijn meegenomen.

Voor termen in de formules geldt het volgende:

INIT geeft de beginwaarde aan voor een parameter.

C is een nog te bepalen constante; Deze constanten zijn in principe voor iedere agent gelijk. Wanneer verschillende constanten in een formule voorkomen, zijn deze C1, C2 of Ca, Cb enzovoort genoemd.

Δ is het dreigingsbesef,
v staat voor snelheid,
r voor plaats,
t voor tijd en
e voor richting.

Vetgedrukte letters zijn vectoren. Bijvoorbeeld de combinatie van snelheid v en richting **e** is **v**.

Cursieve woorden zijn populatieparameters. Een voorbeeld is gewicht. Dat is voor iedere agent anders. Aan de andere kant is het gewicht altijd tussen de 10 en 200 kilo. Populatieparameters hebben een verdeling die overeenkomt met de verdeling van de parameter in de werkelijkheid.

'e' is Eulers e, de basis van de natuurlijke logaritme.

Norm[**z**] is de genormaliseerde (eenheids)vector van **z**. Dat is dus de vector met dezelfde richting als **z**, maar met lengte 1: Norm[**z**] = **z** / || **z** ||

Tijdstap is de tijd die verstrijkt tussen het wederom berekenen van alle formules. Als de tijdstap 1 seconde is en iemand loopt met 2 meter per seconde zal het positieverschil t_0 en t_1 2 meter bedragen. Een te grote tijdstap kan tot ongewenste situaties leiden, waar agents door elkaar kunnen lopen, omdat de uiteendrijvende effecten bij het op t_0 nog geen effect hadden. Een te kleine tijdstap maakt het programma erg traag. Ik heb een tijdstap aangehouden van 0,1 seconde.

5.4.5.1 Formules die de sociale krachten beschrijven

```
SF1  INIT r(t) = (de startpositie hangt af van de situatie)
SF2  INIT v0 = 0
SF3  INIT v(t) = v0
SF4  INIT e0 = C
SF5  INIT e(t) = e0
SF6  r(t+tijdstap) = r(t) + v(t) * tijdstap +
      0.5*krachtTotaal(t) * tijdstap2
SF7  v(t) = v(t) * e(t); snelheid in een richting op dit moment
SF8  v(t) = IF v(t) > maximumSnelheid THEN v(t) =
      maximumSnelheid ELSE v(t) = v(t)
```

Voor iedere agent is een maximale loopsnelheid gedefinieerd. Die kan op geen enkele wijze overschreden worden. Dit komt overeen met de biologische waarheid dat mensen nu eenmaal niet 100 km/uur kunnen lopen, zelfs al zouden ze willen.

SF9 τ = vertragingfactor = C De vertragingfactor bepaalt hoe snel een agent van zijn huidige snelheid op zijn gewenste snelheid komt, mits hij niet gehinderd wordt. Een vertragingfactor van 1 seconde lijkt redelijk.

SF10 $\mathbf{krachtTotaal} = C * \delta \mathbf{v} / \delta t = \{ \mathbf{v}_0(t) - \mathbf{v}(t) \} / \tau + \sum \mathbf{krachtVanAgents} + \sum \mathbf{krachtVanObstakels} + \mathbf{krachtVanCel} + \mathbf{krachtVanGroep}$

SF11 $\mathbf{v}_0(t) = v_0(t) * \mathbf{e}_0(t)$

SF12 $v_0(t)$ = voorkeurssnelheid =

a. IF (GOAL = blijfWaarJeBent) THEN $v_0(t) = 0$

b. IF { $\Delta > C1$ } THEN $v_0(t) = v_{biologisch} * Ca$

c. IF { $\Delta > drempelwaarde$ } THEN $v_0(t) = v_{biologisch} * Cb$

d. IF { $\Delta > C3$ } THEN $v_0(t) = v_{biologisch} * Cc$

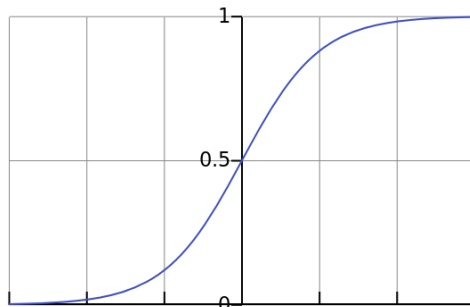
e. Etc. Als Δ een beneden- en bovengrens heeft, kan een functie toegepast worden: $v_0(t) = f(\Delta)$

De voorkeurssnelheid is 0 wanneer het doel niet-verplaatsen is. Op andere momenten is het afhankelijk van het dreigingsbesef. De snelheid gaat stapsgewijs omhoog, elke keer als het dreigingsbesef een grens overgaat. Daarnaast is de snelheid afhankelijk van de $v_{biologisch}$ de snelheid die het lichaam gewoon is te lopen. Ook een mindervalide kan rennen, maar dan wel minder hard dan een jongen van 16. De constante drempelwaarde komt terug in de formule voor de paniekfactor.

SF13 $v_{biologisch} = biologischeSnelheid$

SF14 $\mathbf{e}_0(t) = \text{Norm} [(1-p) * \mathbf{e}_{GOAL} + p * \mathbf{e}_{Gemiddeld}]$ Hoe groter dus de paniekfactor, hoe meer de looprichting afhangt van het gemiddelde van de groep.

SF15 $p = \text{paniekfactor} = 1 / (1 + e^{-\Delta - drempelwaarde})$. Deze is dus afhankelijk van het dreigingsbesef Δ . De paniekfactor ligt hiermee altijd tussen 0 en 1. Als het dreigingsbesef Δ gelijk is aan de drempelwaarde bedraagt de paniekfactor $1/2$. De grafiek van de de paniekfactor als functie van het dreigingsbesef is



Figuur 13 De paniekfactor (y-as) als functie van het dreigingsbesef (x-as). Als het dreigingsbesef gelijk is aan de drempelwaarde, is de paniekfactor een half.

SF16 $\mathbf{e}_{GOAL} = \text{Norm} [r_{GOAL} - r_i]$

SF17 $\mathbf{e}_{Gemiddeld} = \text{Norm} [\sum \mathbf{e}_0(t) \text{ van de agents in het blikveld}]$

SF18 **krachtVanAgents** = $C1 * e^{[(r_{ij} - d_{ij})/C2]} + C3 * g(r_{ij} - d_{ij}) * n_{ij} + \text{krachtDoorFricctie}$

SF19 $r_{ij} = r_i + r_j = \text{omvang}(\text{agent1}) + \text{omvang}(\text{agent2})$

SF20 $d_{ij} = \text{afstand}(\text{agent1}, \text{agent2})$

SF21 $g(r_{ij} - d_{ij}) = \text{IF } \{(r_{ij} - d_{ij}) < 0\} \text{ THEN } g(r_{ij} - d_{ij}) = (r_{ij} - d_{ij})$
 ELSE $g(r_{ij} - d_{ij}) = 0$

De functie g is 0 wanneer $(r_{ij} - d_{ij}) < 0$. Oftewel, wanneer de agent i en j elkaar niet raken is er geen kracht door frictie

SF22 $n_{ij} = \text{Norm}[r_i - r_j]$

SF23 **krachtDoorFricctie** = $C * g(r_{ij} - d_{ij}) * (v_j - v_i) t_{ij}$

SF24 t_{ij} = tangentiële richting; als (a,b) de richting is van de kracht, is (-b,a) de tangentiële richting; deze maakt een hoek van 90° met de oorspronkelijke richting.

SF25 **krachtVanObstakels** = $C1 * e^{[(r_i - d_{iw})/C2]} + C3 * g(r_i - d_{iw}) * n_{iw} + \text{krachtDoorFricctie}$

SF26 $d_{iw} = \text{afstand}(\text{agent}, \text{obstakel})$

SF27 $n_{iw} = \text{Norm}[r_w - r_j]$

SF28 **krachtVanGroep** = IF **afstandGroepsMidden** < *groeps grens* THEN **krachtVanGroep** = *groepsbinding* * Norm[groepsMidden - r(t)]
 ELSE **krachtVanGroep** = 0

SF29 **groepsMidden** = Voor ieder groepslid i waarvoor geldt $d_{ij} < \text{gehoorsafstand}$: $\sum(r(t)_{\text{groepslid}}) / (\#\text{groepsleden})$ De *gehoorsafstand* is 20 meter.

5.4.5.2 Formules die de krachten van de omgeving beschrijven

Zichthoek = 180°. De bissectrice van de zichthoek heeft dezelfde richting als de snelheidsvector v. De agent kijkt dus alleen in de richting waarin hij loopt. De omgeving wordt opgedeeld in kleine vierkante oppervlaktes, cellen genaamd. Een agent kan nog steeds op alle locaties aanwezig zijn en is niet één cel groot. Maar om een omgeving efficiënt te kunnen beschrijven is het makkelijker deze op te delen in cellen met bepaalde eigenschappen.

FF1 $\text{Zichtbaar}(\text{object1}) = \text{IF } \{\text{Is_in}(\text{object1}, \text{blikveld}) \ \&\& \ \text{Eris}(\text{lijn}(\text{agent}, \text{object1}) \text{ waarvoor geldt NOT}(\text{ligtOp}(\text{lijn}, \text{object2}))\}$

Een object is zichtbaar als het in het blikveld ligt en er een zichtlijn is van de agent naar het object.

FF2 $\text{Gezien}(\text{attractor}) = \text{IF } \{\text{Zichtbaar}(\text{attractor}) \ \&\& \ \text{interpretatieFactor} * \text{RandomGetal} > C\}$ Een attractor is Gezien als deze zichtbaar is en de interpretatieFactor en een random getal groot genoeg zijn. De interpretatieFactor is een uiting van het feit dat mensen dezelfde attractor verschillend beoordelen en de attractie kan verschillen. De random factor weerspiegelt het feit dat het even kan duren voordat iets waargenomen wordt of dat de attractor zelfs helemaal over het hoofd wordt gezien.

FF3 **krachtVanCel** = $\sum \text{krachtVanAttractorInCel} + \sum \text{krachtVanOmgevingInCel}$

FF4 **krachtVanAttractorInCel** = IF {Gezien(attractor)} THEN **krachtVanAttractorInCel** = **krachtVan**(attractor, t) / (afstand(cel, attractor))^2 * [] veiligheidDoor ELSE

krachtVanAttractorInCel = 0 Een attractor heeft dus alleen effect als deze Gezien is.

FF5 **krachtVan**(attractor,t) = C

FF6 veiligheidDoor = IF {VoorAlle(lijn(cel, object1) ligt-Op(lijn, object2)} THEN veiligheidDoor = veiligheidVan(object2) ELSE veiligheidDoor = 0 Een cel is veilig als de cel volledig wordt afgeschermd door een object.

FF7 veiligheidVan(object) = C

FF8 **krachtVanOmgevingInCel = krachtVanHelling + krachtVanOndergrond**

FF9 **krachtVanHelling = C * sin(hellingshoek) * hellingsRichting**

FF10 **hellingsRichting = de richting van de dalende helling.**

FF11 **krachtVanOndergrond = C * -v(t)** De ondergrond werkt dus altijd tegen de looprichting in en is dus een soort wrijvingskracht. Hiermee kunnen ook een moeilijk begaanbaar terrein (hoog gras) of obstakels op dat terrein (puin) gesimuleerd worden.

5.4.5.3 Formules die het doel bepalen

GD1 GOAL kan een van de volgende waarden aannemen: blijfWaarJeBent, vluchten, wachten en gaNaarBeginPositie. Dit kan later nog uitgebreid worden met andere doelen, reellen bijvoorbeeld.

GD2 INIT: GOAL = blijfWaarJeBent

GD3 INIT: $\Delta = C$

GD4 $\Delta = \sum \text{waargenomenGevaar} + \sum \text{waargenomenAlarm} + \sum \text{waargenomenAngst} + \text{gezondheidsverandering} - \text{uitdoving}$

GD5 **waargenomenGevaar = IF {Gezien(attractor) && krachtVanAttractor < 0} THEN waargenomenGevaar = krachtVanAttractorInCel * interpretatieFactor ELSE waargenomenGevaar = 0**

GD6 **waargenomenAlarm = IF {afstand(agent, alarm) < C} THEN waargenomenAlarm = alarm * interpretatieFactor ELSE waargenomenAlarm = 0**

GD7 **waargenomenAngst = interpretatieFactor * (gemiddeldeDeltaInR - Delta) * C** Het dreigingsbesef stijgt dus als agents in de buurt een hoger dreigingsbesef hebben dan de agent zelf. Ik heb ervoor gekozen om ook agents buiten het blikveld invloed te laten hebben, omdat geluiden zoals schreeuwen, voetstappen, hijgen en dergelijke ook te horen zijn.

GD8 **gemiddeldeDeltaInR = $\sum \Delta$ in cirkel met straal R / # agents in cirkel met straal R**

GD9 **gezondheidsverandering = (in te vullen door TNO MEP)** De exacte invulling van deze formule zou worden ontwikkeld door TNO Milieu, Energie en Procesinnovatie. Onder andere de invloed van rookgassen op de mens moesten in de gezondheidsverandering naar voren komen. Helaas is deze nooit ingevuld. In het algemeen geldt dat een negatieve gezondheidsverandering het dreigingsbesef doet toenemen.

GD10 **uitdoving = (C * Delta)^{groeiVanGevaar}**

GD11 **groeiVanGevaar = IF {Gezien(attractor) && krachtVan(attractor,t) < 0} THEN groeiVanGevaar = krachtVan(attractor,t) - krachtVan(attractor,t-1)**

- GD12 GOAL =
- IF { $\Delta > dreigingZoHoogDatDirectVluchten$ } THEN DELETE ALL GOALS; GOAL = vluchten
 - IF { $\Delta > dreigingZoHoogDatVluchten$ } THEN GOAL = WACHT *tijdVluchtVoorbereiding*
 - IF {GOAL(gaNaarBeginpositie) == SUCCEEDED} THEN GOAL = blijfWaarJeBent
 - IF {GOAL(WACHT *tijdVluchtVoorbereiding*) == SUCCEEDED} THEN GOAL = vluchten
 - IF {GOAL == vluchten && $\Delta < dreigingZoLaagDatBeginpositie$ } THEN GOAL = gaNaarBeginPositie Deze regel komt maar bij een klein deel van de populatie voor. Zoals al eerder aangegeven veranderen mensen maar moeilijk hun doelen. De vlucht opgeven en weer terugkeren is ook zo'n verandering.
- GD13 r_{GOAL} =
- IF {GOAL == vluchten} THEN $r_{GOAL} = initiëleVluchtroute$
 - IF {GOAL == blijfWaarJeBent} THEN $r_{GOAL} = r(t)$
 - IF {GOAL == gaNaarBeginpositie} THEN $r_{GOAL} = startpositie$

5.4.6 De simulatiecyclus

Om de volgende positie van de agent te bepalen wordt de volgende cyclus doorlopen:

- 1) De agent doorloopt de 3APL-deliberatiecyclus. Het ultieme doel van de agent is *BehoedUzelf* en afhankelijk van de hoogte van het dreigingsbesef kiest de agent voor *blijvenStaan*, *vluchtvoorbereiding* of *vluchten*. Als het dreigingsbesef laag is, is er geen reden tot vluchten en zal de agent kiezen voor *blijvenStaan*. Bij een hoger dreigingsbesef kiest de agent voor *vluchtvoorbereiding* en wacht enige tijd, eer hij overstapt op het doel *vluchten*. Is het dreigingsbesef erg groot, dan wordt direct met *vluchten* begonnen.
- 2) De *Beliefbase* van de agent wordt geüpdatet.
 - het dreigingsbesef wordt berekend aan de hand van die objecten in de omgeving die de agent ziet. Een agent kan niet door muren heen kijken.
 - het geheugen wordt uitgebreid met de gevaren, deuren en doelpunten die de agent nog niet eerder had gezien.
- 3) De volgende positie van de agent wordt berekend. Daarvoor worden alle krachten die op de agent inwerken opgeteld. Om de kracht van het doelpunt uit te rekenen maakt FFFsim gebruik van de gewenste snelheid en richting van de agent.
 - De agent kiest de gewenste richting aan de hand van zijn *doelpunt*, een plek in de ruimte waar hij naar toe wil. Indien er keus is uit meerdere plekken, dan kiest de agent de plek die het dichtst bij is. Als het doel *blijvenStaan* of *vluchtvoorbereiding* is, zal er geen kracht uitgaan van enig doelpunt, zodat de agent nauwelijks zal lopen.
 - De gewenste snelheid is afhankelijk van zijn dreigingsbesef en zijn biologische snelheid. Hoe hoger het dreigingsbesef, hoe

- groter de factor waarmee de biologische snelheid vermenigvuldigd wordt.
- De kracht van andere agents: alleen de agents in het zichtveld en binnen drie meter afstand worden meegewogen. Op afstanden groter dan drie meter is de invloed verwaarloosbaar.
 - De kracht van andere muren: alleen muren binnen het zichtveld en op minder dan drie meter hebben invloed.
 - De kracht van de groep: van ieder groepslid binnen gehoorafstand is de positie bekend. De impliciete aanname is dat groepsleden goed op elkaar letten en veel met elkaar praten. Daardoor weten ze altijd elkaars positie. Het midden van de groep heeft een aantrekkende kracht die afhankelijk is van je verbondenheid met de groep.
 - De kracht van actiepunten: dit is de kracht van gevaren (branden, gassen, instortingen ed.) De afstotende kracht is de grootte van het gevaar gedeeld door de afstand in het kwadraat.
- 4) De aangepaste posities van alle agents worden op het scherm weergegeven en de cyclus start weer bij 1).

Om dit alles te berekenen zijn er functies die informatie uit de omgeving opvragen "geef alle muren" en bewerken "geef alle muren die ik kan zien". Daarnaast zijn er functies die *Beliefs* uit de *Beliefbase* van de agent opvragen "geef dreigingsbesef" en functies die *Beliefs* kunnen toevoegen of veranderen "vervang *Belief dreigingsbesef(10)* door *Belief dreigingsbesef(20)*". Deze functies zijn triviaal en hebben geen invloed op de werking van het model en zijn daarom niet opgenomen in de lijst met formules.

5.5 Overdenkingen bij de implementatie

Pas als je werkelijk het model gaat implementeren in code kom je de zaken tegen waar je nog niet goed over nagedacht had of die complexer blijken te zijn dan vooraf voorzien. Pas dan ook realiseer je je welke tekortkomingen er zijn of welke uitbreidingen wenselijk lijken. Hieronder beschrijf ik de belangrijkste van deze observaties.

5.5.1 Gezondheidssimulatie

TNO MEP was verantwoordelijk voor het aanleveren voor een model van rookgassen op de loopsnelheid en het blikveld. Door verschillende redenen is dat model er nooit gekomen, maar het is niet moeilijk voor te stellen dat dit best een opgave geweest zou zijn. Om dit realistisch te kunnen simuleren is er een model nodig van de verspreiding van rook door een ruimte. Dat heeft onder andere te maken met de hoogte van een ruimte, die in het oorspronkelijke tweedimensionale model niet werd meegenomen. Daarnaast maakt het nogal uit welke gassen in de rook aanwezig zijn. De effecten op ademhaling, zicht en überhaupt de mogelijkheid om te zien –denk aan traangas- hangen af van de stoffen die verbrand worden. Het is niet moeilijk voor te stellen dat dit een complex model zal worden.

5.5.2 Tijdstap

Een andere belangrijke parameter is de tijdstap. Dit is de tijd die verstrijkt tussen twee cycli van berekeningen aan het model. Bij een te kleine tijdstap wordt het model nauwkeuriger, maar ook een veelvoud trager. Bij een te grote tijdstap worden sommige interacties niet berekend. Neem bijvoorbeeld 2 agents die op $t=0$ elkaar tegemoet rennen en nog 3 meter van elkaar verwijderd zijn. De sociale kracht is hier nog erg klein. Als ze beide rennen met 3 meter per seconde, een normale rensnelheid, dan zijn ze na 1 seconde elkaar voorbij en hebben weer 3 meter afstand. Bij een tijdstap van 1 seconde heeft de sociale kracht dus nauwelijks een rol gespeeld en nog erger, ze zijn door elkaar heen gelopen!

Juist als je drukte wil simuleren, met veel krachten die op de agents inwerken, is een kleine tijdstap belangrijk. Aan de andere kant leverde dat een erg trage simulatie op. In de praktijk heb ik gewerkt met een tijdstap van 0,1 seconde; dit leek de beste afweging.

5.5.3 Routes

Eén van de conclusies uit het bestuderen van case studies was dat mensen sterk geneigd zijn op hun vlucht de route te gebruiken die ze ook gebruikt hebben om binnen te komen. Mensen lopen terug langs de weg waarmee ze gekomen zijn. Voor simpele geometrieën is dat de simuleren met één doelpunt, maar voor complexere gebouwen zoals theaters of winkelcentra moet eigenlijk gebruik gemaakt worden van way-points, zodat de agent achtereenvolgens verschillende doelen afloopt. Op dit moment is een dergelijk opvolging van doel-punten nog niet mogelijk met FFFSim.

5.5.4 Zelfversterkende cyclus

FFFSim bestaat in essentie uit een stelsel van formules –het sociale krachtenmodel- aangevuld met formules en redenties die het gedrag beschrijven. Het risico bestaat dat er een cyclus van formules ontstaat dat elkaar versterkt. Vooral het dreigingsbesef is van veel zaken afhankelijk en heeft ook invloed op veel andere factoren. Voorkomen moet worden dat als het dreigingsbesef iets stijgt, het dreigingsbesef daardoor meer gaat stijgen. Het tegenovergestelde is trouwens ook waar: het is niet de bedoeling dat als het dreigingsbesef stijgt, het dreigingsbesef daalt. Dit leidt niet direct tot vreemde simulaties en kan zelfs positief werken; zolang de dempende werking kleiner is dan de initiële stijging kan nog gesproken worden van een negatieve feedbackloop. Maar het is natuurlijk niet de bedoeling dat een stijging van, zeg, 3 punten een daling van 4 punten teweeg brengt

Tijdens de simulaties is van degelijke cycli niet gebleken, maar het is lastig alle mogelijke cycli na te rekenen.

5.5.5 Dreigingsbesef versus paniekfactor

In het sociale krachtenmodel komt de term paniekfactor voor. Bij een grotere paniekfactor wordt de looprichting sterker beïnvloed door de looprichting van de omringende personen. Hiermee wordt kuddegedrag gesimuleerd. Een factor die hier erg op lijkt is het dreigingsbesef. Dit is een

Belief uit de beliefbase, maar wel een met een numerieke waarde. De vraag is dan gerechtvaardigd wat het verschil is tussen beide termen.

Ten eerste zit dat verschil erin dat de paniekfactor tussen de 0 en de 1 ligt en het dreigingsbesef tussen de 0 en oneindig. Ten tweede wordt de paniekfactor alleen beïnvloed door het dreigingsbesef; andersom is er geen relatie. Ten derde is het dreigingsbesef een Belief; het komt door redeneren tot stand. De paniekfactor in het model van Helbing is een constante; een knop om aan te draaien, om mee te experimenteren. Het dreigingsbesef is een veel rijkere term die veel complexer tot stand komt. We hebben dan ook expliciet gekozen voor 'besef' als kern van het woord. Besef impliceert denken, redeneren en zelfbewustzijn. Een 'factor' mist die connotatie. In het geval van FFFSim is dat volledig terecht.

5.5.6 Groepen

Bij de implementatie van groepen gingen mijn gedachten ook uit naar de complexe sociale structuren van de menselijke samenleving. Mensen behoren tot veel groepen tegelijk, ook op openbare locaties als een tunnel. Denk bijvoorbeeld aan personeel of automobilist; nationaliteiten; leeftijdsgroepen; toerist, forens of beroepschauffeur; familie of collega; een eenmaal tijdens de vlucht: de mensen met wie samen gevlucht wordt; diegenen die uitgang A verkiezen boven B; enzovoort. FFFSim is niet toegerust om dit soort complexe sociale verdelingen te simuleren.

5.5.7 Uitbreiding redeneren

Wat voor groepen geldt, geldt ook voor redeneren. Het BDI-model in FFFSim is noodzakerlijkerwijs gesimplificeerd, al was het maar omdat over het menselijk redeneren maar heel weinig bekend is. Desalniettemin betrapte ik mijzelf vaak op de neiging om nog een extra parameter toe te voegen, nog een extra redenatiestap mee te nemen. Het is de kunst om het model ook werkbaar en onderhoudbaar te maken. Dat betekent ook het schrappen van parameters met weinig waarde.

Een gevolg hiervan is dat bijvoorbeeld vluchtvoorbereiding nu gemodelleerd is als een vaste periode die weliswaar per persoon anders is, maar weinig overlaat van de spanning en onzekerheid die mensen vervult, voordat zij aan hun vlucht beginnen.

6 Het werk van Geraerts e.a.

Het model dat Geraerts e.a. van de universiteit Utrecht ontwikkeld hebben, verdient extra aandacht. De reden hiervoor is driedig. Allereerst is zijn werk vanuit een andere inslag tot stand gekomen; hij heeft een achtergrond in het ontwikkelen van games. Daardoor ligt er een groter accent op de snelheid en efficiëntie van berekeningen, op de animatie van agents en bijvoorbeeld op de grootte van agents –in evacuatiesimulaties zul je geen monsters tegenkomen die dubbel zo groot zijn als een mens.

Een tweede reden om het werk van Geraerts nader te bestuderen is dat hij aan de universiteit van Utrecht werkzaam is, waar deze scriptie ook geschreven wordt. Als laatste is er sinds het begin van deze scriptie genoeg tijd verstreken om een vergelijking met recente simulatiesoftware te billijken.

Het model van Geraerts klinkt als één enkel programma, maar bevat in werkelijkheid verschillende softwareprogramma's, posterpresentaties, artikelen, en experimenten. Het overkoepelende kenmerk is dat het (mede) door Roland Geraerts is geschreven, ontwikkeld of uitgevoerd. Voor dit en het komende hoofdstuk zal ik me baseren op de artikelen Goethem, 2015; Toll, 2015; Jaklin, 2015; Kremyzas, 2016 en Toll, 2017.

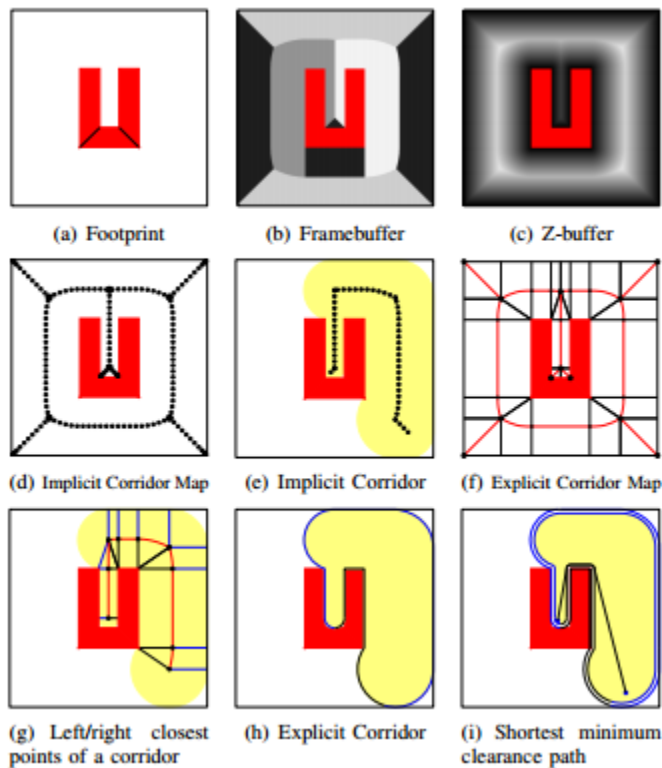
6.1 Navigation Mesh

Een belangrijk deel van het werk van Geraerts houdt zich bezig met de planning van efficiënte paden door de virtuele ruimte. Daarbij is het van belang de ruimte abstract te kunnen weergeven om het (kortste) pad te kunnen berekenen. De algoritmen om deze paden te vinden zijn samen met de computer geëvolueerd; met krachtiger computers kunnen ook computationeel veeleisender algoritmen gebruikt worden. Een opdeling in een 'grid', een netwerk met knopen en paden biedt wiskundig de goedkoopste weg, maar ontbeert bijvoorbeeld de mogelijkheid om obstuctie door tegenliggers te simuleren. Een opdeling in discrete cellen heeft de al eerder besproken beperkingen (5.2), namelijk dat een cel nooit exact de maten van de omgeving kan weergeven; dat kan alleen bij een heel hoog resolutie en gaat daarom gepaard met een hoog geheugen- en processorgebruik.

Om snel te kunnen rekenen aan een continue omgeving is het gebruiken van een Voronoi-diagram een goede oplossing. In zo'n diagram zijn de punten die precies midden tussen twee obstakels liggen van belang. Geraerts heeft dit toegepast op padplanning. Door deze mediale punten te verbinden ontstaat de Implicit Corridor Map (Figuur 14d). Als met deze Implicit Corridor Map het kortste pad berekend wordt, kan de Explicit Corridor Map (ECM) geconstrueerd worden, waarbij de ruimte wordt opgedeeld in vlakken die gescheiden worden door grenzen die wiskundig zijn gedefinieerd. Dit maakt het mogelijk van ieder punt aan te geven welk obstakel het dichtst bij is. In combinatie met een (korste) pad ontstaat dan een corridor waarbinnen een natuurlijk pad worden weergegeven, waar ook het ontwijken van tegenliggers en het afstand houden van vaste obstakels kan plaatsvinden. In Figuur 14i is het resultaat te zien van het korste pad met een zeer kleine minimale afstand

tot obstakels. Bij een grotere minimale afstand ontstaat een veel natuurlijker pad; bij alleen het volgen van de korste route loopt een agent dichter bij de muur dan natuurlijk is.

De corridors bestaan uit geometrische figuren, waardoor er goed mee te rekenen valt. De ECM is specifiek geschikt om uitgerekend te worden door videokaarten; die zijn gemaakt om zeer efficiënt berekeningen aan 2D en 3D representaties te kunnen maken.



Figuur 14 Van 2D-omgeving naar kortste pad, overgenomen uit (Geraerts 2010)

De navigation mesh kan worden uitgebreid met gewogen gebieden (*weighted regions*). Dit zijn gebieden waar een bepaalde aantrekkelijkheid (danwel afstotendheid) vanuit gaat, bijvoorbeeld een mooi uitzicht of etalages (danwel stinkende vuilnisbakken).

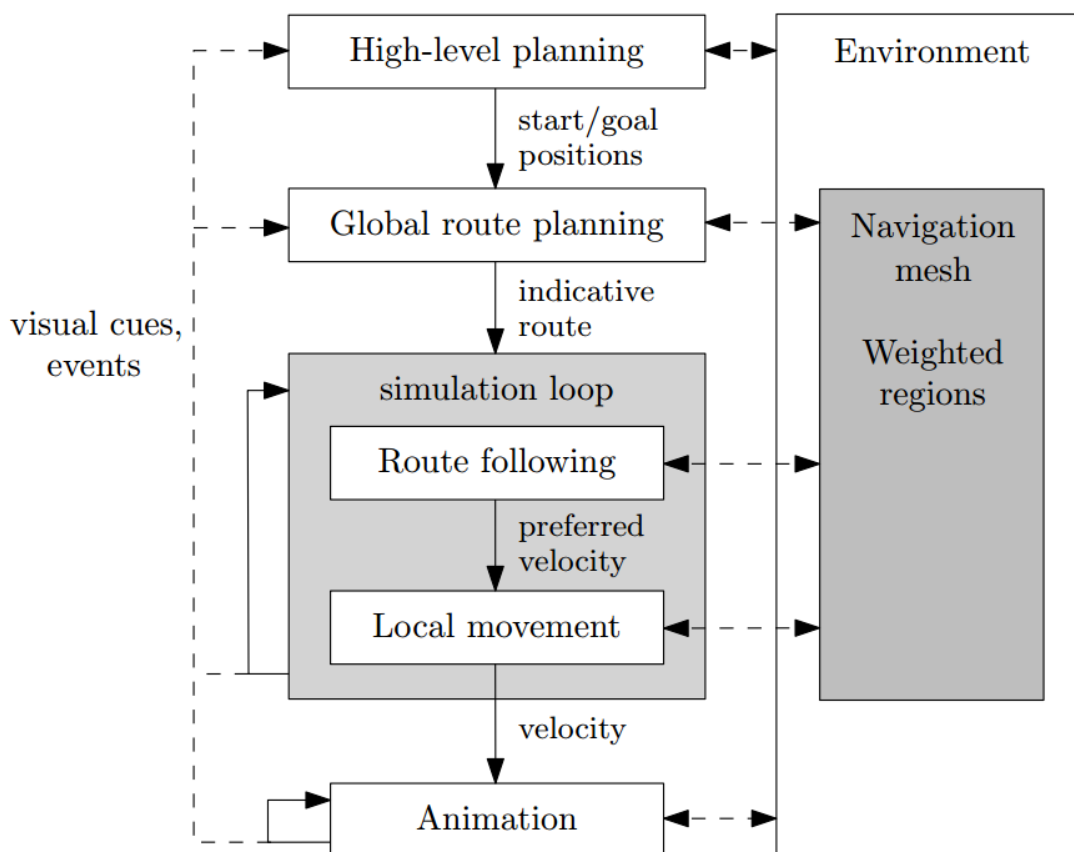
6.2 Crowd Simulation

Geraerts heeft aan de hand van het werk van (Jaklin 2013) een multi-level planningshierarchy ontwikkeld. Deze hiërarchie staat beschreven in Figuur 15. Hij geeft de volgende beschrijving van de verschillende niveaus (vrijwel letterlijk vertaald uit (Toll 2015)):

- 5) *High level planning vertaalt semantische acties (bijvoorbeeld 'ga naar huis') naar geometrische vragen (vind pad van a naar b)*
- 4) *Global planning berekent de indicatieve route; dat is het pad van a naar b dat grofweg gevolgd moet worden. Dit kan de route zijn die het kortst is, mensenmassa's mijdt of langs een attractieve omgeving voert.*

De drie laagste niveaus updaten de agent in iedere stap van de simulatieloop.

- 3) *Route following* laat de agent een gewenste snelheid kiezen waarmee de indicatieve route kan worden gevolgd. Merk op dat de gewenste snelheid een vector is, en dus ook een richting bevat.
- 2) *Local movement* berekent de werkelijke snelheid, die dicht bij de gewenste snelheid ligt, maar rekening houdt met zijn huidige situatie en bijvoorbeeld andere agents ontwijkt.
- 1) *Animation* als laatste verzorgt de visuele beweging van de agent tot en met zijn 3D skelet. De snelheid waarmee de animatie wordt ververst is doorgaans veel hoger dan de snelheid waarmee de simulatie loop doorlopen wordt (doorgaans in 0.1 seconde)



Figuur 15 Multi-level planningshiërarchie

Van boven naar beneden de stappen doorlopend worden de tijdsplannen en de afstand waarnaar gekeken wordt dus kleiner. Het gebruik van deze hiërarchie heeft als voordeel dat voor ieder niveau verschillende technieken gebruikt kunnen worden. De output van het ene niveau wordt dan als input gebruikt voor het niveau een trede lager. Met welke techniek de output wordt berekend, doet voor het model niet ter zake.

De omgeving is bij alle stappen in meer of mindere mate betrokken. De in 6.1 besproken Navigation Mesh verschaft informatie over de omgeving in de

stappen 4 t/m 2. Voor de stappen 5 en 1 is de navigation mesh te gedetailleerd, danwel niet gedetailleerd genoeg.

6.3 Sociale groepen

In de laatste jaren is er meer aandacht gekomen voor de groepsdynamiek in voetgangersstromen. Uit empirisch onderzoek blijkt dat voetgangers in 50% tot 70% van de gevallen in groepen lopen, en meestal in groepen van 2 tot 4 mensen (Moussaïd 2010). Moussaïd (en Geraerts) hebben in dit artikel ook een model ontwikkeld voor het simuleren van groepsgedrag binnen mensenmassa's.

Dit model is gaat uit van de kracht F_{groep} die op een agent inwerkt. Deze groepskracht is opgebouwd uit drie onderdelen:

F_{visie}

$F_{\text{groeps midden}}$

F_{repulsie}

De eerste kracht simuleert het effect dat de groepsleden met elkaar communiceren en daarbij hun hoofd zullen draaien. Dit is lastiger lopen, dus zal de loopsnelheid afnemen.

$F_{\text{groeps midden}}$ is een kracht die de agent naar het midden van de groep toedrijft, mits de agent minstens een bepaalde afstand van het groeps midden verwijderd is.

De laatste kracht dan drukt de agents uit elkaar wanneer zij overlappen – dit is een kracht die ook in het sociale krachtenmodel van Helbing gebruikt wordt, hoewel de mathematische uitwerking verschilt.

Dit model kan de aangepaste snelheid van groepen personen en vorm van hun groep, in een platte v-vorm met de punt naar achteren (Moussaïd 2010), goed verklaren. Bij grotere dichtheden of obstakel voldoet het model echter niet meer. Daarom is een uitbreiding van het model mogelijk.

Geraerts heeft het hierboven beschreven model uitgebreid en aangepast tot wat hij noemt de methode *Social Group and Navigation*. Deze SGN methode definieert twee begrippen die van belang zijn voor een groep:

- 1) Coherentie: de laatste in de groep kan de leider zien
- 2) Socialiteit: alle leden van de groep kunnen elkaar zien

De leider van de groep is het groeps lid dat het dichtst bij het doel is, gerekend op basis van het te volgen pad dat voor de groep is berekend. De laatste van de groep is het groeps lid dat volgens deze definitie het verste weg is van het doel.

Iedere agent heeft een kijkaafstand die minimaal de afstand is van alle groeps leden op een rijtje. In een groep waar de groeps leden achterelkaar aanlopen met tussen hen in de minimale afstand moet de laatste in de groep dus altijd de eerste kunnen zien.

Iedere agent heeft daarnaast een blikveld, zoals gedefinieerd in 5.3.3, met dit verschil dat het blikveld niet loodrecht ten op zichte van de looprichting staat. 'Kunnen zien' zoals gebruikt in de definities van coherentie en socialiteit

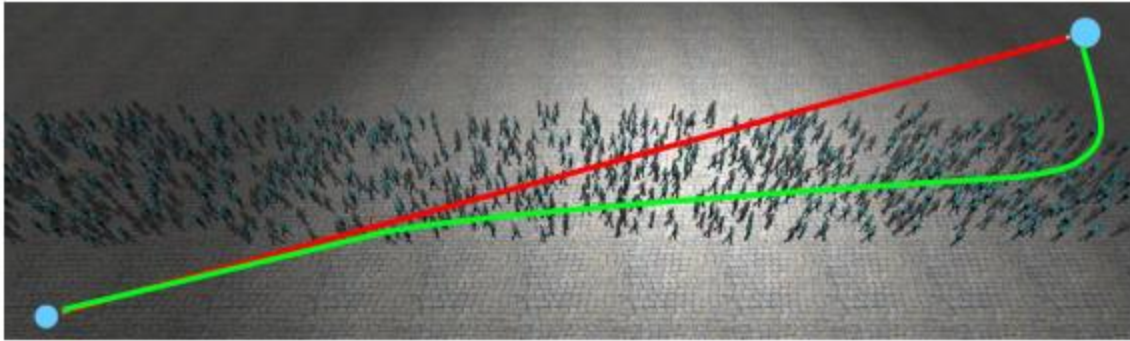
betekent niet per se dat het groepslid in het blikveld is, maar dat deze dat in ieder geval zou kunnen zijn als het blikveld de juiste kant op gedraaid wordt.

Het simuleren van de groep gaat nu als volgt. Na de initialisatie van de groep en de groepsleden wordt bepaald of de groep coherent is. Is de groep niet coherent, dan gaat de leider stilstaan en wachten totdat de groep wel coherent is. Andere groepsleden lopen naar de leider toe en gaan dan ook wachten. De leider gaat stilstaan op een plek waar het rustig is; de leider zal niet wachten op het smalste gedeelte van een druk pad, zoals in de werkelijkheid ook niet gebeurt. Is de groep coherent geworden, dan zal de groep als geheel volgens het berekende pad blijven lopen, totdat of het einddoel wordt bereikt, of de groep coherentie verliest. De socialiteit van de groep wordt niet gebruikt bij om looprichting en –snelheid te bepalen, maar is wel maat voor de juistheid van het model. Groepen mensen lopen doorgaans *sociaal*, dat wil zeggen dat ze op een kleine afstand van elkaar blijven en onderling praten, lachen en anderszins communiceren. Socialiteit is hier een goede maat voor.

6.4 Streaming

In (Goethem, 2015) geven Goethem en Geraerts een methode om het gedrag van een individuele voetganger ten op zichte van een voetgangersstroom (*stream*) te simuleren. *Streaming* wordt ook wel lane formation (4.2.2) genoemd. Volgens hen is deze nieuwe methode nodig, omdat in modellen met agents bij hoge dichtheden de voetgangersstroom vaak helemaal blokkeert, in plaats van een tragere voortgang die in de werkelijkheid wordt geobserveerd. Op vloeistof gebaseerde modellen missen de individualiteit die bij lagere dichtheden juist zichtbaar moet zijn.

De methode die in (Goethem, 2015) wordt beschreven interpoleert tussen de individuele gewenste snelheid en richting en de waargenomen snelheid en richting van de agents in de buurt. Op basis van een *incentive* krijgt de agent een snelheid en richting die meer of minder aansluit bij de snelheid en richting van agents om hem heen. Twee belangrijke details zijn dat de richting alleen wordt aangepast aan de vijf dichtstbijzijnde agents die ook in ongeveer dezelfde richting lopen (maximaal 90 graden verschil) en dat de *incentive* gebaseerd is op de waargenomen dichtheid van de massa. Hoe groter de dichtheid, hoe meer de agent geneigd zal zijn zijn richting aan te passen aan de gemiddelde richting die de agents om hem heen volgen. Als de richting van omringende agents echter te veel afwijkt van de gewenste richting, zal de agent gelijdelijk meer zijn eigen gewenste richting gaan volgen. Hetzelfde effect heeft een te groot verschil tussen de verwachte duur van de route en de tijd die al verstreken is vanaf de aanvang van de wandeling. Oftewel, duurt het allemaal te lang, dan loopt de agent niet meer met de stroom mee, maar volgt hij haastig zijn eigen pad. In Figuur 16 is het verschil te zien tussen een agent die zijn eigen weg volgt (rode lijn) en een agent die weinig eigen motivatie heeft en met de massa meegaat.



Figuur 16 Verschil tussen hoge en lage incentive (uit Goethem 2015)

Het resultaat van het toevoegen van dit algoritme voor het volgen van voetgangersstromen is het sterkst in simulaties waarbij de dichtheid van agents hoog is. Dan ontstaan eerder en sterker de streams, waardoor er minder blokkades optreden en de gemiddelde doorloopsnelheid groter wordt. Ook vinden er minder botsingen plaats.

7 Vergelijking FFFSim vs. Geraerts

Dit hoofdstuk bespreekt de verschillen tussen FFFSim en het model van Geraerts en de voor- en nadelen van de aanpak en uitwerking van beide modellen.

7.1 BDI-architectuur

Het belangrijkste verschil is het ontbreken van een intelligentie van de agents in het model van Geraerts. Het simuleren van dreiging door gevaar, of extra informatie in de vorm van richtingwijzers of communicatie met andere agents is daardoor onmogelijk. Voor het simuleren van voetgangersstromen is dat ook niet direct van belang, omdat het doel van de agents gedurende de simulatie niet wijzigt. FFFSim wil juist de overgang tussen normaal voortbewegen en evacueren danwel vluchten weergeven. Juist tijdens die overgang, waarin een deel van de agents al wel hun doel heeft gewijzigd en het andere deel nog volhardt in de eerder gekozen route leidt tot een realistisch evacuatiemodel.

Vluchtgedrag kenmerkt zich niet door rust en duidelijkheid. Vluchten gaat vaak gepaard met chaos door de (zeer) beperkte kennis van de vluchters over de situatie en de omgeving. Het lijkt daarom niet meer dan logisch deze mentale staat mee te wegen in een evacuatiemodel.

Uiteraard zijn andere BDI-architecturen mogelijk dan 3APL. Een architectuur waarin ook communicatie mogelijk is, is een goede kandidaat voor verder onderzoek. Juist in onzekere situaties kan communicatie met andere personen het gedrag beslissend beïnvloeden. Het is dan ook niet meer dan redelijk dat ook communicatie tussen agents mogelijk moet zijn. 3APL heeft deze mogelijkheid niet expliciet. Binnen FFFSim is er wel voor gekozen dat agents het dreigingsbesef van andere agents kunnen waarnemen. Dat is een soort van communicatie, maar deze wordt niet binnen het BDI-framework gemodelleerd.

7.2 Padplanning

Padplanning zoals Geraerts' model veronderstelt is zeer geschikt voor de simulatie van voetgangers waarvan mag worden verondersteld dat ze weten waar ze naar toe moeten. Op openbare plaatsen als stations en theaters en bij grote evenementen zullen weinig mensen niet weten waar ze naar toe moeten; door de omgeving zelf, die vergelijkbaar is met soortgelijke locaties; door richtingaanwijzers en bordjes die aangeven waar het doel zich bevindt; door personeel dat aanwijzingen geeft; en vooral de kennis van de mensen die er veel vaker geweest zijn. Bij een noodsituatie raken bekende paden ineens afgesloten en zullen mensen gebruik moeten maken van nieuwe, onbekende routes.

Het model van Geraerts biedt geen mogelijkheid om van doel te veranderen. Deze doelselectie vindt plaats in de laag *high level planning* (zie Figuur 15), waar Geraerts verder geen uitwerking aan geeft. Als het doel

bepaald is, berekent zijn model in de laag *Global route planning* het globaal te volgen pad. Dat is een stap die onafhankelijk is van (ontbrekende) kennis van de omgeving. Tijdens een evacuatie kunnen mensen kiezen voor een route die uiteindelijk afgesloten blijkt te zijn. Dat is binnen het model van Geraerts niet mogelijk.

Bij FFFSim worden in twee aparte processen berekeningen gemaakt die van invloed zijn op de snelheid en richting van de agent. De 3APL-module bepaalt het doel mede op basis van het dreigingsbesef. Het sociale-krachtenmodel berekent de lokale interacties met andere agents.

Op een bepaalde manier lijkt dit op de multi-level planningshiërarchie van Figuur 15, het vijfde niveau, high level planning, vindt plaats in de 3APL-module, local movement wordt geregeld door het sociale-krachtenmodel. Van de niveaus global route planning en route following wordt geen gebruik gemaakt; in FFFSim wordt geen expliciete route berekend, snelheid en richting zijn niet afhankelijk van een vooraf gepland pad.

Dit is zonder meer het grootste verschil tussen FFFSim en het model van Geraerts: het ontbreken van padplanning binnen FFFSim. De filosofie van FFFSim is dat agents hun route moeten bepalen op basis van de omgeving die ze waarnemen, niet op basis van wat het pad-planningsalgoritme berekend heeft. Zo kunnen in noodsituaties op basis van de ervaren dreiging en omgeving het loopgedrag bepaald worden. Het model van Geraerts bevat geen informatiestroom omhoog, waarmee lokale waarnemingen niet beschikbaar zijn voor de levels *Global path planning* en *High level planning*. Het model biedt wel de mogelijkheid dit alsnog toe te voegen.

Voor het simuleren van voetgangersstromen bij grootschalige evenementen en zeker bij games is padplanning een manier zonder extra rekenkracht *real time* tot geloofwaardige simulaties te komen. Lokale vertragingen en ontwijkingen kunnen dan nog steeds door de lagen *Route following* en *Local movement* gesimuleerd worden. Ook het ontwijken van dynamische veranderingen van de omgeving (een ingestorte muur, of blokkade door een politieagent) is op deze manier mogelijk.

7.3 Computationale afwegingen

Geraerts wijdt altijd in zijn artikelen enige alinea's aan de computationele kosten. Geraerts' heeft in het begin van zijn carrière veel zaken onderzocht die in games toepasbaar moesten te zijn. Voor games geldt dat voor een vloeiend verloop een snelle, efficiënte berekening nodig is; voor een evacuatiesimulatie is het niet erg als die enkele minuten of zelfs uren kost om door te rekenen. Liever een nauwkeurig resultaat dan een resultaat dat direct beschikbaar is.

De algoritmen die Geraerts gebruikt zijn vanuit deze achtergrond altijd efficiënt en snel uit te voeren. Aan de andere kant zijn sommige parameters of formules ietwat beperkt of simpel opgezet. Een aantal voorbeelden:

- 1) Plaatselijke dichtheid: om de neiging tot streaming van een agent te berekenen moet de plaatselijke dichtheid te berekend worden. De regel die Geraerts gebruikt is dat als de dichtheid van agents in het gezichtsveld groter is dan 3 personen per vierkante meter, de

- dichtheid zijn maximale waarde heeft bereikt. Een hogere dichtheid heeft voor de verdere berekening geen effect. Nu is 3 personen per vierkante meter inderdaad een grote dichtheid, maar de veronderstelling dat hogere dichtheid niet meer effect zou hebben op de simulatie is niet onderbouwd.
- 2) Daarnaast is het gezichtsveld een halve cirkel met een straal van 8 meter. Voor het berekenen van lokale dichtheid lijkt 8 meter een redelijke maat, maar voor het berekenen van de richting van de *stream* van de agents in de buurt is het een willekeurig gekozen en misschien ook te kleine maat. Waarom zou een agent zijn snelheid en richting niet aan kunnen passen op agents die verder dan 8 meter weg lopen?
 - 3) Eveneens binnen het *streams*-model geldt de beperking dat alleen naar de 5 dichtsbijzijnde agents wordt gekeken om de snelheid en richting van de stream vast te stellen. Waarom niet voor 4 of 6, of alle agents binnen het gezichtsveld wordt gekozen is niet duidelijk.
 - 4) Sommige variabelen worden kunstmatig tussen de 0 en 1 gehouden, door middel van de formule $\min(\max(x, 0), 1)$, waarbij x de te berekenen variabele is. Deze formulering introduceert twee willekeurige einden aan het continue bereik van de parameter, terwijl punten net buiten dat bereik wellicht ook informatie bevatten die van invloed zouden moeten zijn op de uitkomst.
 - 5) De groepsgrootte voor het SGN model is maximaal 4. Groepen van 5 komen natuurlijk ook voor, en het model kan makkelijk aangepast worden om dat in te passen, maar om computationele redenen is ervoor gekozen om dit te maximeren op 4 agents.

7.4 Groepsmodel

Binnen FFFSim is het effect van de groep gedefinieerd als een kracht die de agent naar het midden van de groep trekt. Het midden van de groep is gedefinieerd als het gemiddelde van alle posities van de groepsleden die de agent kan zien. Als dat afstand tot het midden van de groep minder is dan de drempelwaarde, is de groepskracht nihil. Sociale interactie binnen de groep wordt niet gesimuleerd, dus constellaties waarin de groepsleden makkelijk met elkaar kunnen praten zijn niet mogelijk, zoals dat wel mogelijk is bij (Moussaid, 2010). Ook het gedrag dat groepsleden op elkaar wachten op een rustiger plek nadat ze door drukte uit elkaar gedreven zijn, kan niet worden gesimuleerd.

Het model van Geraerts is veel uitgebreider. Als de groep niet compleet is, wacht de leider van de groep totdat dat weer het geval is. De leider is degene die het verst gevorderd is op het pad naar het doel. De leider wacht alleen op de rest wanneer de lokale dichtheid niet te groot is, wat in werkelijkheid ook waargenomen is (Fruin 1971).

Een verschil met FFFSim is dat bij FFFSim de groepskracht naar het midden van de alle groepsleden binnen gehoorsafstand wijst, terwijl dit bij het model van Geraerts de kracht naar het midden van alle groepsleden wijst. Dit zou tot ongewenste resultaten kunnen leiden als de groepsleden ver van elkaar

verwijderd zijn. Het kwijtraken van een lid van de groep is echter niet mogelijk, want de groep gaat pas verder lopen als deze eerst bij elkaar gekomen is, coherent geworden is. Nu gebruikt Geraerts groepen van maximaal 4 agents, dus de kans dat zo'n groep in werkelijkheid uit elkaar valt, is klein, maar in hectische situaties, is het zeer wel mogelijk dat iemand het contact met de groep verliest. Hiervoor biedt dit model echter geen oplossing.

Een ander mogelijk ongewenst gevolg is dat het model van Geraerts geen rekening houdt met obstakels. Een muur tussen groepsleden hoeft geen beperking te zijn om toch groepsgedrag te laten plaatsvinden. Dat is ongeloofwaardig. FFFSim heeft dezelfde beperking.

Een kanttekening uit persoonlijke ervaring is dat wanneer een groep uitelkaar gevallen is, er twee andere soorten gedrag plaatsvinden: de leider(s) gaan minder hard lopen, terwijl de achterblijvers juist hun snelheid vergroten. Echt stilstaan zoals het model van Geraerts veronderstelt, gebeurt minder snel. En als de leiders dan stilstaand wachten op de achterblijvers, beginnen zij al met lopen voordat de achterblijvers echt zijn aangesloten, zij het in een langzamer tempo. Nader onderzoek zal moeten uitwijzen of dit gedrag universeel is en of het zodanig van invloed is, dat het gemodelleerd moet worden.

Wat dat betreft levert een kracht naar het groepsmidden wel dit gedrag, de leiders worden geremd, de achterblijvers versneld en niemand staat stil. Deze oplossing is echter te eendimensionaal om gecompliceerder gedrag goed te kunnen beschrijven.

Bij het model van Geraerts zijn de loop- en kijkrichting gescheiden. Door deze toevoeging is het mogelijk om voor kleine groepen realistische formaties te vormen. Een groep van 3 personen zal, wanneer de lokale dichtheid dit toelaat, in een platte v-vorm lopen. Op deze wijze kunnen alle drie de groepsleden elkaar aankijken. Daarvoor is het wel nodig dat de buitenste leden opzij kijken en hun kijkrichting dus niet meer gelijk is aan hun looprichting. Dit vergt meer coordinatie en gaat dan ook ten koste van de snelheid van lopen. Het model van Geraerts kan dit gedrag simuleren, bij FFFSim is dit niet mogelijk.

8 Antwoord op de onderzoeksvraag

8.1 Antwoord op de deelvragen

Hieronder volgt een kort antwoord op de gestelde deelvragen.

8.1.1 Wat is het gedrag van voetgangers?

Ongehinderd lopen mensen met hun biologische snelheid. Mensen hebben een persoonlijke ruimte; zij vinden het niet prettig als anderen te dicht bij staan. De relatie tussen de snelheid, de dichtheid en de doorstroming (flow) van lopende mensen wordt beschreven door het Fundamentele Diagram. Als de dichtheid toeneemt, neemt de loopsnelheid af. Maximale flow wordt bereikt bij een snelheid van 0,7 m/s en een dichtheid van 2 personen/m². Als de dichtheid nu nog verder toeneemt, daalt zowel de flow als de snelheid. Bij een dichtheid van meer dan 5 mensen per vierkante meter is de loopsnelheid nihil. Bij groepen lopende mensen doen zich nog andere verschijnselen voor zoals oscillatie bij deuren en lane formation bij tegengestelde voetgangersstromen.

8.1.2 Hoe verandert dat gedrag in noodsituaties?

Het blijkt erg lastig om het gedrag van mensen te veranderen in vluchtgedrag. Mensen wachten af en kijken naar elkaar. Als uiteindelijk de beslissing te vluchten is genomen, heeft men vaak nog even nodig om er toe over te gaan: vluchtvoorbereiding. Tijdens het vluchten is de loopsnelheid hoger dan normaal, maar de intelligentie neemt af. Hierdoor kan arching ontstaan bij versmallingen en dit kan leiden tot verdrukking. Alarmbellen en -lichten geven geen informatie over het gevaar. Het gebrek aan kennis over het gevaar en de omgeving zorgt voor kuddegedrag. Schreeuwen, duwen, doelloos rondrennen of verwaasd blijven staan: *paniek* is een bekend beeld uit de populaire cultuur. Toch blijkt dit gedrag niet te bestaan.

8.1.3 Zijn er andere modellen die (delen van) dit gedrag beschrijven?

De eerste voetgangersmodellen waren macroscopisch. Deze maakten alleen gebruik van globale parameters als dichtheid en flow; ze waren dan ook gebaseerd op gas- of vloeistofmodellen. Hoewel dichtheid en flow goed gemodelleerd worden, is het met deze modellen niet mogelijk om asymmetrisch gebruik van uitgangen te simuleren. Microscopische modellen beschouwen iedere persoon an sich en kunnen dus individueel gedrag simuleren. Veel commercieel beschikbare microscopische modellen maken gebruik van een discrete ruimte: de ruimte wordt opgedeeld in vakjes van één persoon groot. Dit betekent dat er maar een beperkt aantal looprichtingen en dichtheden mogelijk zijn. Een aantal verschijnselen van lopende groepen mensen zoals oscillatie is daarom niet te simuleren.

8.1.4 Wat is het sociale-krachtenmodel?

Het sociale-krachtenmodel heeft de volgende kenmerken:

1. Het beschrijft individuele personen (agents)
2. Iedere agent heeft een biologische snelheid

3. Er werken sociale krachten op de agent in, zoals afstoting door persoonlijke ruimte
4. Er werken fysische krachten op de agent in, zoals afstoting door een muur
5. Er werken andere sociale kracht op de agent in, zoals aantrekking door een doel
6. De snelheid en richting van de agent wordt beïnvloed door de snelheid en richting van de agents om hem heen: kuddegedrag
7. De mate waarin kuddegedrag plaatsvindt, is afhankelijk van de paniekfactor.

8.1.5 Welke aanpassingen moeten aan dit model gedaan worden?

De belangrijkste tekortkoming van het sociale krachtenmodel is dat de agents geen intelligentie hebben. Ze missen het redeneervermogen om hun doelen aan te passen naar aanleiding van hun waarnemingen. De eerste aanpassing moet dus het toevoegen van een BDI-schil zijn. Een van de beliefs die de agent op basis van zijn waarnemingen zal aanpassen is zijn dreigingsbesef: hoe bedreigend is mijn omgeving. Afhankelijk daarvan zal de agent zijn doel aanpassen.

De laatste belangrijke wijziging is dat een agent bij een groep behoort. De agents in een groep zijn belangrijker voor een agent dan willekeurige agents. Agents zullen proberen als groep te vluchten.

8.1.6 Hoe kan dit model geïmplementeerd worden?

De vereisten om het voorgestelde model in software te vatten zijn een Agent Management Systeem (AMS), een 3APL-implementatie en een GUI. Voor het AMS is gekozen voor spyse, dat geschreven is in python. 3APL wordt uitgevoerd door prolog. Om toch met 3APL te kunnen werken heeft TNO een prolog-implementatie en 3APL-parser geschreven in python. Voor de GUI wordt gebruik gemaakt van WxWidgets.

8.1.7 Welke problemen komen bij deze implementatie naar boven?

Een moeilijke parameter om in te stellen is de tijdstap. Een te lage waarde maakt de simulatie traag, een te hoge waarde onrealistisch. Het simuleren van een verminderde gezondheid op het lopen van de agents is nooit van de grond gekomen. Het implementeren van het vluchten langs de weg waarmee de agent gekomen is, lijkt onrealistisch met één doel-punt in een complexe omgeving. Nagaan of sommige combinaties van formules elkaar niet versterken of uitdoven is lastig.

8.2 Antwoord op de onderzoeksvraag

De onderzoeksvraag was: *Welke aanpassingen aan het sociale-krachtenmodel zijn nodig om evacuaties uit een tunnel te kunnen simuleren?*

Na het onderzoek concludeer ik dat het grootste gemis aan het sociale krachtenmodel is dat de agents geen intelligentie hebben. Ze kunnen geen

keuzes maken over hun gedrag. Een uitbreiding van het model met een vorm van waarneming en redeneren voor agents is dus nodig.

Hierin moeten in ieder geval een dreigingsbesef dat al dat niet leidt tot de beslissing om te vluchten, vluchtvoorbereiding en doelselectie een rol in spelen.

9 Discussie

Verdere doorontwikkeling van dit model is gewenst. De gedragscomponent is nu vrij beperkt. Voor simulatiedoeleinden kan een simpel gedragsmodel voor veel situaties goede inzichten leveren. Maar specifieke kennis over de omgeving of over bepaalde gevaren heeft een uitgesproken invloed op evacuaties. Denk bijvoorbeeld aan BHV'ers of reddingswerkers die aanwijzingen geven. Bij een brand in een skilift in Kaprun in 2000 zorgde het advies van een brandweerman (loop naar beneden in de tunnel, daar komt de stijgende rook niet!) ervoor dat 12 mensen de ramp overleefden. Zij waren de enige overlevenden.

Het menselijk gedrag, met al zijn vuistregels, herinneringen, sociale interacties moet teruggebracht worden tot behapbare proporties om te kunnen simuleren. Hierbij gaat veel verloren, maar dat hoeft niet per se invloed te hebben op de uitkomst van de simulatie. Wel is het van belang dat de gebruiker van een simulatie zich hiervan bewust is. Aan de andere kant geldt dat FFFSim vooral waar het gaat om de het simuleren van kennis over de omgeving en de interactie tussen mensen in gezinnen, vriendengroepen en dergelijke nog veel te winnen heeft. Verder onderzoek naar deze zaken lijkt mij dan ook noodzakelijk. Ook de invloed van rookgassen en hitte op de gezondheid verdient verder onderzoek.

Hoewel het anomalieën lijken, zijn het juist de kleine zaken die grote invloed kunnen hebben. Een branddeur die op slot zit, een brandweerman met kennis, de wind die de rook ongunstig voortdrijft. Ook hier ligt een taak voor de gebruiker van het model: alleen diegene die zich bewust is van de beperkingen, kan voorbereidingen treffen voor een evacuatie. Alleen vertrouwen op een simulatie om, bijvoorbeeld, de locatie van brandblussers te bepalen is niet genoeg.

De ontwikkeling van 3APL heeft sinds 2007 vrijwel stilgelegen. Dat is jammer voor de verdere ontwikkeling van FFFSim. Gelukkig zijn er vele alternatieven mogelijk die BDI en soortgelijke frameworks beschikbaar maken, vaak ook in programmeertalen die makkelijker te gebruiken zijn met Python dan 3APL, dat voor prolog geschreven is.

De ontwikkeling van FFFSim laat zien dat kunstmatige intelligentie gebruikt kan worden voor het simuleren van menselijk gedrag in combinatie met modellen die menselijk gedrag simuleren gebaseerd op fysische wetten. Dat biedt mogelijkheden voor andere combinaties van dit soort modellen. Wellicht kan het onderzoek naar de economische beslissingen van burgers in combinatie met economische wetmatigheden of de gevolgen van klimaatverandering op dierengedrag baat hebben bij een combinatie van deze techniek.

Een laatste overdenking betreft het goed evalueren van simulaties. Het blootstellen van proefpersonen aan (gesimuleerde) levensgevaarlijke omstandigheden brengt nogal wat ethische problemen met zich mee. Het is daarom lastig om een evacuatiemodel goed te ijken. Wellicht geeft de toegenomen beschikbaarheid van videocamera's meer precieze data dan tot nu toe voor handen was –hoewel die toename ook wat ethische problemen met zich meedraagt, maar dat is een persoonlijke noot.

10 Literatuur

Bierlaire, M., Antonini, G., & Weber, M. (2003). Behavioral dynamics for pedestrians (<i>No. EPFL-CONF-86990</i> , pp. 1-18). IEEE.
Boer, L. C., & Veldhuijzen van Zanten, D.W. (2007). Behaviour on tunnel fire. <i>Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005</i> (91-98). Springer Berlin Heidelberg.
Boer, L.C. & Veldhuijzen van Zanten, D.W. & Vredevel, A.W. (2006). Behaviour when passengers embark into lifeboats or life rafts. <i>TNO DV3 2006-C008</i> , TNO Human Factors.
Boer, L.C. & Veldhuijzen van Zanten, D.W. (2005). Picking up shipwrecked people: The pilot ladder tested. <i>TNO DV3 2005-M056</i> , TNO Human Factors.
Boer, L.C. Winer, J. & Norén, A. (2004). Human Behavior during Tunnel Evacuation: Basic Data. <i>TM-04-C002</i> . Soesterberg: TNO Technische Menskunde.
Bryan, J.L. (2002). <i>Behavioral Response to Fire and Smoke</i> . SFPE Handbook of Fire Protection Engineering Third Edition 3-12 (3315-3341). Quincy MA: National Fire Protection Association.
Daamen, W., Hoogendoorn, S., & Bovy, P. (2005). First-Order Pedestrian Traffic Flow Theory. <i>Transportation Research Record: Journal Of The Transportation Research Board, 1934</i> , 43-52. http://dx.doi.org/10.3141/1934-05 .
Fruin, J.J. (1971), Design for Pedestrians: A Level-of-Service Concept. <i>Highway Research Record. 355</i> (1-15).
Fruin, J.J. (1971), <i>Pedestrian Planning and Design</i> , Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners Inc, New York.
Galea, E.R. (2000). Simulating Evacuation and Circulation in Planes, Trains, Buildings and Ships Using the EXODUS Software. <i>Pedestrian and Evacuation Dynamics</i> (203-226).
Goethem van, A., Jaklin, N., Cook IV, A., & Geraerts, R. (2015). On streams and incentives: A synthesis of individual and collective crowd motion. <i>Technical Report Series, (UU-CS_2015-005)</i> .
Hall, Edward T. (1966). <i>The Hidden Dimension</i> . Anchor Books. ISBN 0-385-08476-5.
Helbing, D. & Molnar, P. (1998) Self-Organization Phenomena in Pedestrian Crowds. arXiv:cond-mat/9806152v1 .
Helbing, D. & Molnar, P. (1998). Social force model for pedestrian dynamics. arXiv:cond-mat/9805244v1 .
Helbing, D., Buzna, L., Johansson, A., & Werner, T. (2005). Self-Organized Pedestrian Crowd Dynamics: Experiments, Simulations, and Design Solutions. <i>Transportation Science, 39(1)</i> , 1-24. http://dx.doi.org/10.1287/trsc.1040.0108 .
Helbing, D., Farkas, I., & Vicsek, T. (2000). Simulating dynamical features of escape panic. <i>Nature, 407(6803)</i> , 487-490.
Helbing, D., Farkas, I.J., Molnar, P., & Vicsek, T. (2002). Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. <i>Pedestrian and evacuation dynamics, 21(2)</i> , 21-58.

Helbing, D., Molnar, P., Farkas, I., & Bolay, K. (2001). Self-Organizing Pedestrian Movement. <i>Environment And Planning B: Planning And Design</i> , 28(3), 361-383. http://dx.doi.org/10.1068/b2697 .
Henderson, L. (1974). On the fluid mechanics of human crowd motion. <i>Transportation Research</i> , 8(6), 509-515. http://dx.doi.org/10.1016/0041-1647(74)90027-6 .
Hoogendoorn, S.P., & Bovy, P.H. (2001). Platoon-based multiclass modeling of multilane traffic flow. <i>Networks and Spatial Economics</i> , 1(1), 137-166.
International Maritime Organization (1999) Interim Guidelines for a Simplified Evacuation Analysis of Ro-Ro Passenger Ships. http://www.imo.org/includes/blastDataOnly.asp/data_id=1821/909.pdf .
Jaklin N.S., Kremyzas A. & Geraerts R. (2015) Adding Sociality to Virtual Pedestrian Groups, <i>Proceedings of the 21th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST 2015)</i> , pp. 163-1726.
Jaklin, N., Toll van, W., & Geraerts, R. (2013). Way to go-A framework for multi-level planning in games. <i>Planning in Games Workshop (Vol. 11)</i> .
Jin, T. (1997). Studies On Human Behavior And Tenability In Fire Smoke. <i>Fire Safety Science</i> , 5, 3-21. http://dx.doi.org/10.3801/iafss.fss.5-3 .
Johnson, C. (2005). Lessons from the evacuation of the world trade centre, 9/11 2001 for the development of computer-based simulations. <i>Cognition, Technology & Work</i> , 7(4), 214-240. http://dx.doi.org/10.1007/s10111-005-0009-5
Kisko, T.M., Francis, R.L., Nobel, C.R. 1998. EVACNET4 User's Guide. University of Florida, http://tomkisko.com/ise/files/evacnet/EVAC4UG.HTM
Kremyzas A., Jaklin N.S. & Geraerts R. (2016) Towards Social Behavior in Virtual-Agent Navigation, <i>Science China - Information Sciences</i> , 59:112102 (pp 1-17).
Kukla, R., Willis, A., & Kerridge, J. (2003). Application of context-mediated behavior to a multi-agent pedestrian flow model (PEDFLOW). Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC.
Lakoba, T.I & Kaup, D.J. (2003). Exploration of the parameter range of a continuous-space, agent-based model for pedestrian evolution.
Low, D.J. (2000). Statistical physics: Following the crowd. <i>Nature</i> , 407(6803), 465-466.
Meeussen, V.J.A. & Tromp, A.J. (2004). Ontruimingsmodellering m.b.v. rekenregels en m.b.v. buildingEXODUS; casestudy Concertgebouw Amsterdam. 2004-CVB-R0347. Delft: TNO Centrum voor Brandveiligheid.
Moussaïd, M., Perozo, N., Garnier, S., Helbing, D., & Theraulaz, G. (2010). The walking behaviour of pedestrian social groups and its impact on crowd dynamics. <i>PloS one</i> , 5(4), e10047.
Older, S.J. (1968). Movement of pedestrians on footways in shopping streets. <i>Traffic Engineering and Control</i> 10(4): 160-163.
Peter, F. (2000) The causes, effects & control of real tunnel fires. http://www.ditzingen.de/fileadmin/Dateien/Dateien/Feuerwehr/Downloads/Einsatz_und_Unfaelle/A770080604729351_real_tunnel_fires.pdf
Predtechenskii, V., & Milinskii†, A. (1978). <i>Planning for foot traffic flow in buildings</i> = (1st ed.). New Delhi: Published for the National Bureau of

Standards, U.S. Dept. of Commerce, and the National Science Foundation, Washington, D.C. by Amerind Pub. Co.
Proulx, G. (1991). Passengers' behavior during an underground evacuation. <i>Environment Design Research Association Conference No. 22</i> (pp 118-125)
Proulx, G. (2001). Occupant behaviour and evacuation. In <i>Proceedings of the 9th International Fire Protection Symposium</i> (pp. 219-232).
Proulx, G. (2002). Movement of People: The Evacuation Timing. <i>SFPE Handbook of Fire Protection Engineering Third Edition</i> (pp 3342-3367). Quincy MA: National Fire Protection Association.
Reynolds, C. (1987). Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. <i>ACM SIGGRAPH Computer Graphics</i> , 21(4), 25-34. http://dx.doi.org/10.1145/37402.37406 .
Sarkar, A.K. and Janardhan, K.S.V.S. (1997) A study on pedestrian flow characteristics, <i>Proceedings</i> . Transportation Research Board: Washington.
Schadscheider, A. (2002). Cellular Automaton Approach to Pedestrian Dynamics - Theory. <i>Pedestrian and Evacuation Dynamics</i> (75-86).
Sime, J. (1985). Movement toward the Familiar: Person and Place Affiliation in a Fire Entrapment Setting. <i>Environment And Behavior</i> , 17(6), 697-724.
Still, G.K. (2000). <i>Crowd Dynamics</i> . PhD Thesis, University of Warwick. www.crowddynamics.com .
Sugiyama, Y. et al. (2008). Traffic jams without bottlenecks—experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam", <i>New Journal of Physics</i> .
Tajima, Y., Takimoto, K., & Nagatani, T. (2002). Pattern formation and jamming transition in pedestrian counter flow. <i>Physica A: Statistical Mechanics And Its Applications</i> , 313(3-4), 709-723. http://dx.doi.org/10.1016/s0378-4371(02)00965-2 .
Tanaboriboon, Y., Hwa, S. S., & Chor, C. H. (1986). Pedestrian characteristics study in Singapore. <i>Journal of transportation engineering</i> , 112(3), 229-235.
Toll van W.G., Cook IV A.F., Kreveld van M.J. & Geraerts R. (2017). The Explicit Corridor Map A Medial Axis-Based Navigation Mesh for Multi-Layered Environments, <i>arXiv:1701.05141v1</i> .
Toll van, W., Jaklin, N., & Geraerts, R. (2015). Towards believable crowds: A generic multi-level framework for agent navigation. <i>ICT.OPEN.2015</i> .
Virkler, M. R., & Elayadath, S. (1994). Pedestrian speed-flow-density relationships (No. HS-042 012).
Weidmann, U. (1992). <i>Transporttechnik der Fußgänger</i> . ETH Zürich.
Wiseman, R. (2007). Pace of Life. http://www.richardwiseman.com/quirkology/pace_home.htm .