Planning voor kinderen met spierziekten en zenuwaandoeningen in het AMC

Bacheloropdracht

Ellen Dibbits, Bert Kiewiet en Marjan van der Velde

Begeleiders: Nelly Litvak en Nikky Kortbeek

11 juni 2010

UNIVERSITEIT TWENTE.

Inhoudsopgave

1 Inleiding

Het Academisch Medisch Centrum (AMC) is het grootste ziekenhuis van Nederland, in 2008 zijn er ruim 410.000 patiënten behandeld.[3] In het ziekenhuis zijn patiëntenzorg, onderzoek en onderwijs geïntegreerd. Het ziekenhuis streeft ernaar om zowel de kwaliteit van dienstverlening naar patiënten toe te verhogen, alsmede de kosten te reduceren.

In het AMC worden onder andere kinderen met neuromusculaire aandoeningen behandeld. Neuromusculaire aandoeningen worden ook wel spierziekten genoemd en zijn vaak progressief, wat inhoudt dat de klachten toenemen in de loop van de tijd. Spierziekten ontstaan vaak sluipend maar kunnen zich ook meteen na de geboorte openbaren. Een aantal voorbeelden van neuromusculaire aandoeningen zijn de ziekte van Duchenne, de ziekte van Becker en Charcot Marie Tooth. Voorbeelden van klachten bij spierziekten zijn spierkrampen na inspanning, op late leeftijd leren lopen, of zelfs helemaal niet leren lopen, afwijkingen in de standen van de gewrichten en afnemende spierkracht. Spierziekten worden op verschillende leeftijden ontdekt, zo ontstaan bij de ziekte van Becker de eerste verschijnselen tussen het vijfde en het dertigste levensjaar, terwijl bij HMSN 1, een variant van Charcot Marie Tooth, de eerste verschijnselen zich vaak rond het tiende levensjaar openbaren.[5]

Ouders van kinderen met een neuromusculaire aandoeningen hebben, net als de Vereniging voor Spierziekten Nederland en Agis Zorgverzekeringen, aangegeven dat de huidige manier van behandelen voor deze kinderen sterk verbeterd kan worden en dat dit ook wenselijk is. Dit zou onder andere kunnen door de zorg beter te coördineren en het aantal ziekenhuisbezoeken voor patiënten omlaag te brengen. Deze betere coördinatie van de zorg is nodig omdat patiënten met een neuromusculaire aandoening door veel verschillende artsen van verschillende disciplines behandeld worden. Door de betere coördinatie kunnen de verschillende behandelende artsen beter overleggen en zal er ook meer duidelijkheid zijn voor de ouders.

Op dit moment moeten kinderen met een neuromusculaire aandoening gemiddeld vijf tot zeven maal per jaar naar het ziekenhuis afreizen, maar er zijn ook uitschieters, waarbij een patiënt dertig keer in een jaar naar het ziekenhuis moet komen. Dit is vanwege de gezondheid van de patiënt erg belastend voor zowel patiënt als de ouders of verzorgers. Het is dus van belang zo veel mogelijk afspraken voor een patiënt op één dag te plannen, voor zover de patiënt dat aankan.

Om de aan de wensen van de patiënt tegemoet te komen zal er een centraal aanspreekpunt komen. Dit centraal aanspreekpunt zal in de vorm van een neuromusculair centrum (NMA centrum) opgezet worden. Het centrum zal een samenwerkingsverband worden tussen de verschillende disciplines die van belang zijn bij NMA patiënten, met een centraal aanspreekpunt in het ziekenhuis. Een aantal keer per jaar zullen er behandeldagen gepland worden.

In dit onderzoek is een wiskundig planningsmodel voor de afspraken van patiënten met een neuromusculaire aandoening in het ziekenhuis gemaakt. Dit model genereert met gegevens van patiënten een rooster dat voldoet aan verschillende wensen en eisen van het AMC en de patiënten. Als het centrum open is, zal het planningsmodel gaan dienen als een beslissingsondersteunend hulpmiddel. Daarnaast is ook de toegangstijd van patiënten van een eventueel NMA centrum onderzocht. Oftewel er is gekeken naar de verdeling van de tijd die een patiënt zal moeten wachten tot deze patiënt daadwerkelijk in het ziekenhuis komt.

In het tweede hoofdstuk zal worden ingegaan op de exacte probleemstelling van het onderzoek en zal de context beschreven worden. Vervolgens wordt in het derde hoofdstuk de aanpak van het planningsmodel en het toegangstijdenmodel beschreven, waarbij het eerste deel van dit hoofdstuk gaat over het planningsmodel en het tweede deel over de toegangstijdenmodel. Het vierde hoofdstuk beschrijft de resultaten die uit simulaties van de modellen komen. Hier is onder andere beschreven wat de invloed van bepaalde wensen van het AMC is op de toegangstijd. Als laatste zullen in het vijfde hoofdstuk conclusies getrokken worden en aanbevelingen gegeven worden aan de hand van de resultaten.

2 Probleembeschrijving

In dit onderzoek worden de mogelijkheden voor het oprichten van een neuromusculair centrum (NMA centrum) met betrekking tot het plannen van afspraken voor patiënten tot achttien jaar met, of op verdenking van, een neuromusculaire aandoening onderzocht. Omdat patiënten met een neuromusculaire aandoening veel onderzoeken en consulten moeten ondergaan, zullen zij vaak een ziekenhuis moeten bezoeken. Aangezien dit mentaal en psychisch zwaar is voor zowel de patiënt als de ouders of verzorgers, wordt er met het openen van NMA centrum gestreefd naar een reductie in het aantal ziekenhuisbezoeken van een patiënt.

Er zijn patiënten waar nog geen neuromusculaire aandoening vastgesteld is, maar waar wel een verdenking van een dergelijke aandoening is. Deze patiënten komen voor een diagnose. Daarnaast heb je zogenaamde follow-up patiënten. Bij hen is al een neuromusculaire aandoening vastgesteld en zij komen voor controle en een vervolgbehandeling. In het volgende gedeelte zal eerst het huidige proces toegelicht worden en vervolgens het gewenste proces in het op te richten NMA centrum.

2.1 Huidig proces

Zowel patiënten die voor de eerste keer komen alsmede follow-up patiënten hebben een breed scala aan onderzoeken en behandelingen nodig. Deze afspraken worden vaak onafhankelijk van elkaar ingepland bij de verschillende afdelingen van het ziekenhuis. Vaak moeten de ouders of verzorgers van een patiënt zelf de zorg coördineren, zoals bijvoorbeeld afspraken maken en uitslagen van onderzoeken opvragen. Dit heeft als gevolg dat de verschillende delen van de behandeling door verschillende dokters geregeld worden. Het ziekteverloop van de patiënten wordt daardoor niet goed gemonitord, waardoor het behandeltraject niet optimaal is. Een voorbeeld hiervan is de volgorde van afspraken, zo worden die soms in een verkeerde volgorde gepland, waardoor voor de specifieke behandeling belangrijke uitslagen nog niet binnen zijn bij de behandelend arts.

2.2 Gewenst proces

In de gewenste situatie is er een NMA centrum, die de patiënten gecoördineerd door het behandelingsproces heen kan helpen.

Diagnostiek

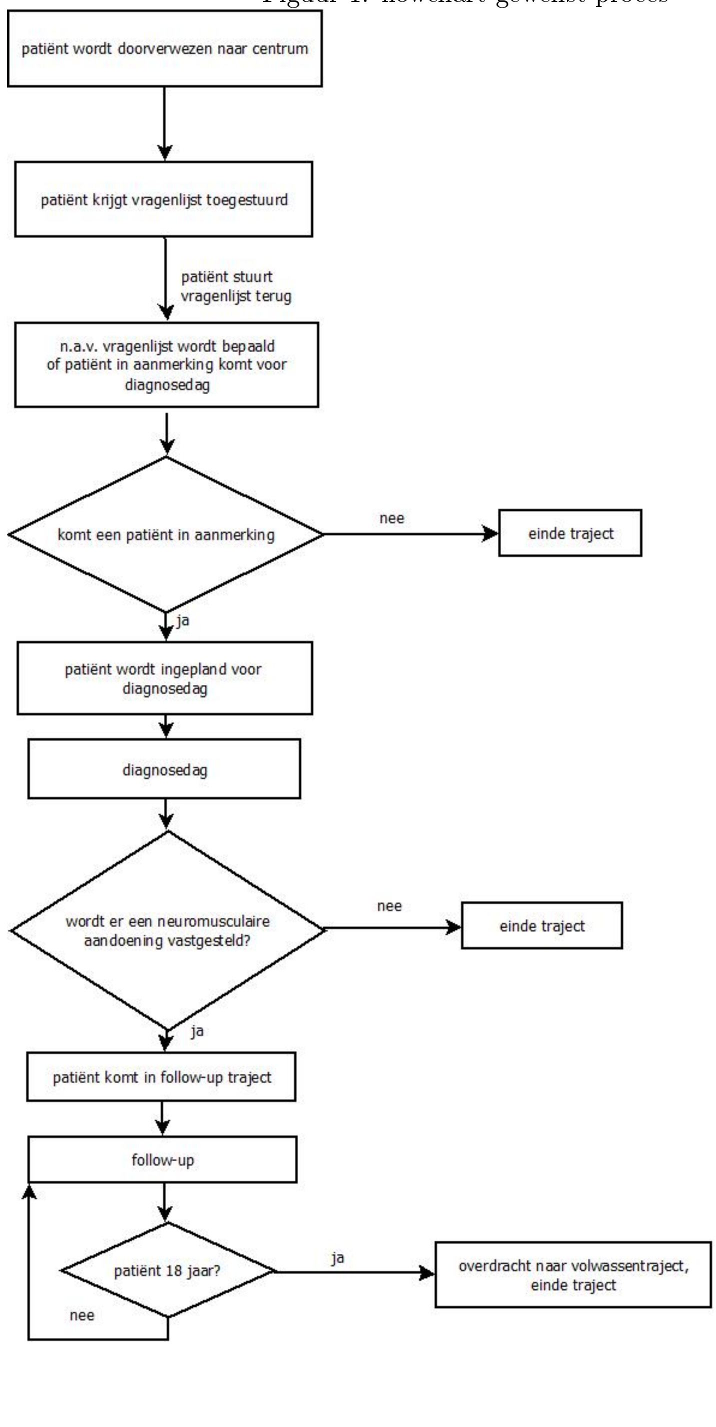
In eerste instantie zal een patiënt, bij wie een verdenking voor een neuromusculaire aandoening is, zich moeten aanmelden voor een diagnosedag. Dit kan door een externe verwijzing, bijvoorbeeld door een huisarts, of een interne verwijzing door een specialist binnen het AMC. Voordat een patiënt afspraken kan laten inplannen moet gekeken worden welke afspraken er nodig zijn. Dit wordt gedaan met behulp van een vragenlijst. Deze vragenlijst wordt naar de patiënt verstuurd en nadat deze lijst beantwoord en teruggestuurd is, wordt er bepaald of de patiënt in aanmerking komt voor een diagnosedag. Op basis van de vragenlijst wordt vastgesteld om welke verdenking het gaat en daarmee de verschillende afspraken die deze patiënt nodig heeft. Vervolgens zal uitgezocht worden welke patiënten op de volgende diagnosedag zullen komen. Hierbij wordt rekening gehouden met verschillende factoren. De toegangstijd van de verschillende patiënten mag niet te hoog oplopen, daarbij hebben patiënten die al langer wachten voorang op nieuwere patiënten. De afspraken van deze patiënten moeten ook aan de verschillende voorwaarden voldoen.

Bij het plannen van deze afspraken wordt er ook rekening gehouden met het verschil tussen noodzakelijke en wenselijke afspraken. Noodzakelijke afspraken moet een patiënt in elk geval ondergaan, dus deze moeten zoveel mogelijk op één dag gepland worden. De wenselijke afspraken zijn, zoals de naam al zegt, niet noodzakelijk dus als deze afspraken niet ingepland kunnen worden, hoeft een patiënt hier ook niet voor terug te komen. Als de patiënt ingepland is voor een diagnosedag wordt dat aan de patiënt doorgegeven. Op de diagnosedag wordt vervolgens door middel van onderzoeken en consulten een voorlopige diagnose gesteld. Na een paar weken wordt door middel van een telefoongesprek de uiteindelijke diagnose doorgegeven aan de patiënt. Als dit een neuromusculaire aandoening is, dan komt een patiënt terecht in het follow-uptraject. Met behulp van het planningsmodel en de multidisciplinaire insteek van het NMA centrum worden alle diagnose onderzoeken op één dag gedaan.

Follow-up

Het follow-uptraject is bijna gelijk aan het diagnosetraject behalve dat iedere patiënt eens per jaar naar het ziekenhuis moet komen voor nieuwe onderzoeken en behandelingen. Welke afspraken een patiënt nodig heeft en of een afspraak noodzakelijk of wenselijk is, wordt wederom vastgesteld op basis van een vragenlijst. De onderzoeken en behandelingen zijn om te monitoren hoe de patiënt zich ontwikkelt en eventueel de behandeling aan te passen. Welke onderzoeken een patiënt moet ondergaan ligt aan de precieze aandoening van de patiënt, alsmede het stadium waarin de aandoening zich bevindt. Per aandoening is er vastgesteld wat de noodzakelijke en wenselijke afspraken van die groep zijn. Het planningsmodel kan dus een combinatie van patiënten plannen om er voor te zorgen dat de behandeltijd zo goed mogelijk benut wordt en alle patiënten iedere twaalf tot vijftien maanden aan de beurt zijn. De patiënt verlaat het traject als diegene achttien jaar is, omdat deze patiënt dan doorverwezen moet worden naar een volwassentraject. Samengevat ziet het gewenste proces er dus uit zoals in figuur 1.

Figuur 1: flowchart gewenst proces



2.3 Onderzoeksdoelen

Om inzicht te krijgen in het planningsprobleem, de toegangstijden van patiënten voor een diagnosedag en om te onderzoeken in hoeverre aan verschillende doelstellingen en wensen van het AMC haalbaar en verenigbaar zijn, zijn de volgende twee doelen vastgesteld.

Planningsmodel Er wordt een wiskundig model gemaakt waarmee dagplanningen moeten worden gerealiseerd. Dagplanningen moeten zodanig zijn dat voldaan wordt aan alle eisen, en zoveel mogelijk wensen, van de patiënten en behandelaars. Door middel van simulaties worden uitspraken gedaan over de mogelijke roosters en de capaciteit van een NMA centrum. Tenslotte wordt geanalyseerd hoe dit verbeterd zou kunnen worden.

Toegangstijdmodel Omdat de aankomstmomenten van patiënten onzeker zijn, worden de toegangstijden van patiënten voor een diagnosedag met behulp van een wiskundig model onderzocht. Er worden voor verschillende situaties kansverdelingen voor de toegangstijden berekend om vervolgens aanbevelingen te geven hoe toegangstijd van patiënten acceptabel kan blijven. Tenslotte zal het effect van het planningsmodel op de toegangstijden geanalyseerd worden.

3 Aanpak

3.1 Dagplanning

In het gewenste proces waarbij een patiënt naar het NMA centrum komt, zullen de afspraken van de patiënt, voor zover mogelijk, op dezelfde dag plaatsvinden. Het plannen van deze afspraken zou natuurlijk iedere keer met de hand kunnen gebeuren, maar daarbij is het gevaar dat dat veel tijd zal kosten en dat er niet efficiënt gepland zal worden. Ook is het moeilijk om met de hand een planning te maken die aan alle eisen voldoet, de behandeltijd optimaal benut wordt en ervoor zorgt dat iedereen op tijd aan de beurt komt. Om het plannen dus zo goed mogelijk te kunnen doen, zal een wiskundig model, waarmee de afspraken ingepland kunnen, worden uitkomst bieden. Aangezien er verschillende criteria voor de planning zijn, zal het centrum deze moeten afwegen. Daarnaast is de planning afhankelijk van verscheidene randvoorwaarden, de eerder genoemde eisen, die komen kijken bij het behandelen van patiënten en/of met de logistiek in het ziekenhuis.

Doordat de patiënten en het ziekenhuis soms tegenstrijdige belangen hebben, zullen er afwegingen tussen de belangen van deze twee groepen gemaakt moeten worden. Aan de ene kant wil de patiënt zo kort mogelijk in het ziekenhuis zijn en dus zo min mogelijk wachten. Ook is het voor de patiënten wenselijk zo min mogelijk verplaatst worden en is het voor de rolstoelpatiënten wenselijk zo weinig mogelijk in en uit hun rolstoel te moeten. Aan de andere kant is het voor het ziekenhuis van groot belang dat artsen en therapeuten efficiënt worden ingezet. Daarom is het van belang zoveel mogelijk te voorkomen dat er gaten in hun roosters vallen. Om dit allemaal te bewerkstelligen zullen dus afwegingen gemaakt moeten worden tussen de belangen van de patiënten en de behandelaars. Een model biedt inzicht in welke invloed bepaalde van deze afwegingen hebben.

3.2 Planningsmodel

Het planningsprobleem met alle voorwaarden en verdere informatie zal eerst worden geformuleerd als een wiskundig model. Voor deze planning is gekozen om het probleem te formuleren als een Integer Lineair Program (ILP). Hiervoor is gekozen omdat dit een goede manier is om het probleem wiskundig te beschrijven omdat het veel vrijheid geeft en omdat er vele programma's aanwezig zijn die een ILP op kunnen lossen. Deze programma's worden ook wel 'solvers' genoemd. Ook is het gebruikelijk een ILP te gebruiken bij optimalisatieproblemen, wat ook het probleem is waar het hier over gaat. Het resultaat van dit wiskundig model en de solver zal een planning opleveren voor een enkele behandeldag.

3.2.1 Variabelenlijst

Gegeven een set patiënten met voorgeschreven noodzakelijke en wenselijke afspraken en gegegeven beschikbaarheid van de behandelaars wordt er een planning gemaakt. Er zullen zoveel mogelijk patiënten ingepland worden. Dit kan voor een patiënt de volgende consequenties hebben:

- Een patiënt wordt ingepland. Sommige patiënten hebben zoveel afspraken nodig dat dit niet op één dag zal passen. Zo'n patiënt wordt dan ingepland als $geplande\ tijd \geq \frac{benodigde\ afspraaktijd}{aantal\ dagen\ nodig}$. Als een patiënt (nog) maar één dag nodig heeft, dan betekent dit dat al zijn afspraken ingepland moeten worden om aan deze voorwaarde te voldoen.

- Een patiënt wordt als extra patiënt ingepland. Dit betekent dat bijna alle afspraken ingepland zijn. Bij de input kan worden aangegeven hoeveel afspraken er over mogen blijven.

- Een patiënt wordt niet ingepland. De patiënt zal op een andere dag ingepland moeten worden.

Bij het plannen zal zoveel mogelijk geprobeerd worden een patiënt volledig in te plannen. Pas als dat niet lukt, wordt geprobeerd om de patiënt als extra patiënt in te plannen. Mocht dat ook niet lukken, dan zal de patiënt op een andere dag ingepland moeten worden.

Om de afspraken te kunnen plannen wordt de dag opgedeeld in verschillende blokjes, deze worden tijdsloten genoemd. Deze kunnen bijvoorbeeld een kwartier lang zijn. Een afspraak heeft dan een lengte van één of meer tijdsloten.

In dit hoofdstuk worden de verschillende variabelen en parameters toegelicht die horen bij het ILP. In de eerste paragraaf worden de indices toegelicht, vervolgens de inputparameters, waarna de algemene variabelen worden toegelicht. Als laatste worden de beslissingsvariabelen uitgelegd. Per paragraaf zal in een tabel een korte beschrijving per variabele worden gegeven en worden de mogelijke waarden van de variabelen ook gegeven. In de tekst staat een uitgebreidere uitleg van de variabelen en parameters.

Indices

Er gebruik gemaakt van een aantal indices, omdat de verschillende variabelen afhangen van onder andere de desbetreffende patiënt en het tijdstip. De indices zijn te vinden in tabel 1.

Tabel 1: indices planningsmodel

variabele	betekenis	mogelijke waarden
i	tijdslot	$\mathbb{N}$
j	patiënt	$\mathbb{N}$
k	behandelaar	$\mathbb{N}$
p	procedure	$\mathbb{N}$

De eerste index is de i staat voor de tijd. De dag is opgedeeld in tijdsloten en i geeft het nummer van het desbetreffende tijdslot. De index j staat voor een bepaalde patiënt. De index k gaat over een behandelaar. Dit kan ook iemand zijn die een bepaald onderzoek uitvoert of begeleidt. Als laatste is er de index p die een bepaalde procedure, bijvoorbeeld een behandeling of consult, aangeeft.

Roostertechnische parameters

Voor het maken van de planning zijn gegevens nodig over de behandelaars en procedures. Deze informatie is onafhankelijk van de patiëntgegevens. Te denken valt bijvoorbeeld aan de roosters van de artsen. De parameters zijn te vinden in tabel 2.

Tabel 2: roostertechnische parameters planningsmodel

parameter	betekenis	mogelijke waarden
K	Matrix die aangeeft of bepaalde procedures tegelijkertijd gedaan kunnen worden.	0 of 1
D	Matrix die aangeeft welke behandelaar welke procedures kan. Het element D_{kp} geeft aan of behandelaar k procedure p kan uitvoeren.	0 of 1
$T1$	Matrix die aangeeft of er een volgorderelatie is. Het element $T1_{pq}$ geeft aan of procedure q na p moet.	0 of 1
$T2$	Matrix die aangeeft hoeveel tijd er tussen twee procedures moet zitten. Het element $T2_{pq}$ geeft aan hoeveel tijdsloten er tussen het aflopen van procedure p en het starten van procedure q moet zitten.	$\mathbb{N}$
R	Rooster van behandelaar. Het element R_{ik} geeft aan of behandelaar k op tijdslot i beschikbaar is.	0 of 1
b	Vector waarin het minimum aantal afspraken van de behandelaars staat. Element b_k staat voor het minimum aantal afspraken van behandelaar k.	$\mathbb{N}$

De matrix K geeft aan of procedures wel of niet samen plaats kunnen vinden. Een nul in deze matrix betekent dat het niet kan, een één dat het wel kan. Matrix D geeft aan welke behandelaars welke procedures kunnen uitvoeren. De matrix is dus afhankelijk van k, de behandelaars en p, de procedures. In deze matrix betekent een nul dat een behandelaar de procedure niet kan uitvoeren en een één dat de behandelaar dat wel kan.

In de matrix $T1$ zijn de volgorderelaties gedefinieerd. Als procedure p voor q moet, of als q na p moet, dan $T1_{pq} = 1$. Als het niet uitmaakt, dan $T1_{pq} = 0$. In matrix $T2$ is gedefinieerd hoeveel tijdsloten er tussen twee verschillende procedures moeten zitten als er een volgorderelatie is. Het element $T2_{pq}$ geeft aan hoeveel tijd er na het aflopen van p en het beginnen van procedure q tenminste moet zitten. Als er geen tijd tussen hoeft te zitten, dan is het element gelijk aan nul. Het nagesprek moet bijvoorbeeld na het laatste consult, waar dus geen tijd tussen hoeft te zitten. Maar het kan twee uur duren voor de uitslag van een onderzoek binnen is, waardoor er tenminste twee uur tussen het onderzoek en het bijbehorende consult moet zitten.

In matrix R staat wanneer behandelaars beschikbaar zijn, waarbij een nul betekent dat de behandelaar niet beschikbaar is en een één dat de behandelaar dat wel is. De matrix is afhankelijk van de behandelaars k en de tijdsloten i.

In de vector b staat het minimum aantal afspraken van patiënten met een neuromusculaire aandoening met de behandelaars. Hierbij betekent een nul dat het niet uitmaakt hoeveel afspraken deze behandelaar heeft, bijvoorbeeld in het geval van de röntgenfotograaf. Een twee betekent dat het een arts is die tenminste twee behandelingen ingepland heeft.

Parameters patiënten

Voor het maken van de planning zijn verschillende patiëntgegevens nodig. Zo moet bijvoorbeeld bekend zijn welke afspraken een patiënt nodig heeft en hoeveel tijd daarvoor gereserveerd moet worden. Deze parameters zijn te vinden in tabel 3.

Tabel 3: parameters patiënten planningsmodel

parameter	betekenis	mogelijke waarden
a	Vector die aangeeft hoeveel tijdsloten aan behandelingen een patiënt aan kan op één dag. Het element a_j geeft aan hoeveel tijdsloten aan behandelingen patiënt j aan kan.	$\mathbb{N}$
L	Matrix met de lengte van de afspraken. Het element L_{jp} geeft aan hoeveel tijdsloten patiënt j met procedure p bezig is.	$\mathbb{N}$
Q	Matrix met de noodzakelijke afspraken. Het element Q_{jp} geeft aan of voor patiënt j een procedure p tot de set van noodzakelijke afspraken behoort.	0 of 1

In de vector a staat per patiënt hoeveel tijdsloten aan behandelingen die patiënt per dag aan kan. Een twaalf betekent hier dat de desbetreffende patiënt twaalf tijdsloten exclusief pauzes aan behandelingen aan kan.

De matrix L geeft aan hoeveel tijdsloten een patiënt bezig is met een bepaalde procedure, dus het element L_{jp} geeft aan hoeveel tijdsloten patiënt j bij procedure p ondergaat. Deze matrix geeft ook aan of een patiënt een procedure wel of niet moet ondergaan, immers nul tijdsloten houdt in dat de procedure niet nodig is.

De matrix Q geeft aan of voor patiënt j procedure p tot de noodzakelijke afspraken behoort. Als Q_{jp} is één, dan is procedure p voor patiënt j een noodzakelijke afspraak. Als Q_{jp} is nul, dan is het geen noodzakelijke afspraak.

Endogene parameters

De voorgaande paragrafen met parameters geven voldoende informatie om een goede planning te kunnen maken. Er zijn echter enkele parameters die in het model berekend zouden kunnen worden, maar waarvan het wenselijk is ze als input te geven. Deze zijn te vinden in tabel 4.

Tabel 4: endogene parameters planningsmodel

parameter	betekenis	mogelijke waarden
α	Vector die aangeeft hoeveel dagen een patiënt nodig heeft. Het element α_j geeft aan hoeveel follow-up dagen patiënt j waarschijnlijk nodig heeft.	$\mathbb{N}$
o	Vector die aangeeft hoeveel afspraken een patiënt over mag houden. Het element o_j geeft aan hoeveel afspraken patiënt j over mag houden als deze patiënt als extra patiënt geaccepteerd wordt.	$\mathbb{N}$

In de vector α staat per patiënt hoeveel dagen deze nodig heeft om in elk geval alle noodzakelijke afspraken gepland te krijgen. Als hier een één staat dan kunnen voor de desbetreffende patiënt (de rest van) zijn noodzakelijke afspraken op één dag gepland worden. Deze waarden zijn afhankelijk van de tijd die een patiënt aan afspraken nodig heeft en hoeveel diezelfde patiënt aan kan op een dag. Toch worden de waarden van deze vectoren ingevoerd en niet berekend, dit omdat er voor de patiënten verschillende redenen kunnen zijn om de afspraken wat meer uit te smeren, dan wel juist wat krapper te plannen. Bij deze redenen kan er bijvoorbeeld gedacht worden aan een patiënt die kortgeleden ziek is geweest of waarvan de ouders hebben aangegeven de reis erg belastend te vinden. Bij het invoeren van deze gegevens moet opgelet worden dat het niet conflicteert met de andere gegevens.

In de vector o staat hoeveel afspraken een patiënt over mag houden als deze als extra patiënt naar het centrum komt. Het maakt hier niet uit welke noodzakelijke afspraak/afspraken deze patiënt over houdt. Ook hier moet opgelet worden dat er geen conflicterende waarden ingevuld worden.

Variabelen

In het planningsmodel worden verschillende variabelen gebruikt om het rooster te construeren. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen beslissingsvariabelen en variabelen die van de beslissingsvariabelen afhangen. De variabelen zijn te vinden in tabel 5. De variabele x_{ijp}, waarde 0 of 1, geeft aan of in een tijdslot i een procedure p begint voor patiënt j.

Tabel 5: variabelen planningsmodel

variabele	betekenis	mogelijke waarden
x_{ijp}	begintijd afspraak in i^etijdslot voor j^epatient met procedure p	0 of 1
s_j^{min}	vector bestaande uit starttijdsloten van de patiënten	$\mathbb{N}$
s_k^{min}	vector bestaande uit starttijdsloten van de behandelaars	$\mathbb{N}$
s_j^{max}	vector bestaande uit eindtijdsloten van de patiënten	$\mathbb{N}$
s_k^{max}	vector bestaande uit eindtijdsloten van de behandelaars	$\mathbb{N}$
y_k	variabele die aangeeft of een arts op het centrum aanwezig is of niet	0 of 1
$L2$	Matrix die aangeeft of een patiënt behoefte heeft aan een bepaalde procedure. Het element $L2_{jp}$ geeft aan of patiënt j behoefte heeft aan procedure p	0 of 1

De vector s_j^{min} geeft de starttijdsloten weer van de patiënten. Dit is dus het tijdslot met de eerste ingeplande behandeling. De vector s_k^{min} geeft de starttijdsloten weer van de behandelaars. De vector s_j^{max} geeft de eindtijdsloten weer van de patiënten en de vector s_k^{max} geeft de eindtijdsloten van de behandelaars. De variabele y_k geeft aan of een behandelaar die dag een patiënt uit het NMA centrum moet behandelen of niet. y_k is 0 als behandelaar k op de geplande dag niet hoeft te komen, en heeft de waarde 1 als er wel afspraken voor deze behandelaar gepland zijn.

De matrix $L2_{jp}$ geeft aan of een patiënt behoefte heeft aan een bepaalde afspraak, ongeacht of deze wenselijk of noodzakelijk is. Als $L2_{jp}$ nul is dan heeft patiënt j geen behoefte aan procedure p, maar als $L2_{jp}$ één is dan heeft patiënt j behoefte aan een afspraak voor procedure p.

Beslissingsvariabelen

Beslissingsvariabelen geven de noodzakelijke informatie over het rooster, zoals bijvoorbeeld welke patiënt naar een behandeldag komt en welke niet. Deze beslissingsvariabelen zijn te vinden in tabel 6. De beslissingsvariabele z is afhankelijk van de indices i, j, k en p en geeft aan of in tijdslot i de procedure p van patiënt j bij behandelaar k begint. Of een patiënt op een bepaalde dag wel of niet naar het centrum komt wordt aangegeven met de variabele g. Deze heeft waarde nul of één, waarbij nul betekent dat de behandelaar niet komt en één dat de behandelaar wel komt. De variabele g is afhankelijk van patiënt j en is een beslissingsvariabele omdat afhankelijk van de waarde van g een patiënt wel of niet naar het centrum komt op een bepaalde dag. De beslissingsvariabele c_{jpq} geeft aan of patiënt j zowel procedure p als procedure q ingepland heeft. Is de waarde nul dan zijn ze beide ingepland, is de waarde één dan is dat niet het geval. De beslissingsvariabele e_j geeft aan of een patiënt j al dan niet geaccepteerd, en dus ingepland, is als extra patiënt.

Tabel 6: beslissingsvariabelen planningsmodel

variabele	betekenis	mogelijke waarden
z_{ijkp}	begintijd afspraak in i^etijdslot voor j^epatient bij behandelaar k met procedure p	0 of 1
g_j	patiënt j al dan niet volledig ingepland	0 of 1
c_{jpq}	geeft aan of patiënt j zowel procedure p als q heeft	0 of 1
e_j	patiënt j al dan niet als extra patiënt geaccepteerd	0 of 1

3.2.2 Doelfunctie

Hieronder wordt de doelfunctie toegelicht. Eerst zullen verschillende te optimaliseren doelfuncties worden toegelicht, die daarna samengevoegd worden.

De verschillende doelfuncties zijn als volgt:

1. Het gewogen aantal volledig ingeplande patiënten maximaliseren. Hiervoor is er per patiënt een weging β_j nodig wisselend per behandeldag. Een patiënt die al in behandeling is kan bijvoorbeeld weging tien krijgen en een patiënt die binnen nu en vier maanden aan de beurt moet zijn weging één.
$$max \sum_j g_j \cdot \beta_j \tag{1}$$

2. De behandeltijd voor een patiënt per dag maximaliseren:
$$max \left[\sum_i \sum_j \sum_p x_{ijp} \cdot \tau \cdot Q_{jp} \cdot L_{jp} + \sum_i \sum_j \sum_p x_{ijp} \cdot \sigma \cdot L_{jp} \right] \tag{2}$$
De eerste helft van deze doelfunctie maximaliseert het aantal noodzakelijke afspraken. De τ is hier de weging van de noodzakelijke afspraken. In het tweede deel worden de wenselijke afspraken gemaximaliseerd, waar σ de weging van de wenselijke afspraken is. Er is voor deze waarden $\tau = 2$ en $\sigma = 1$ gekozen omdat wenselijke afspraken vaak langer zijn dan noodzakelijke afspraken. Op deze manier wordt gegarandeerd dat er nog wel wenselijke afspraken worden ingepland, maar dat de noodzakelijke als belangrijker worden gezien.

3. De tijd dat een patiënt moet wachten terwijl deze in het ziekenhuis is, moet minimaal zijn. Hier wordt dus het verschil tussen het moment dat de patiënt het centrum binnenkomt en het moment dat diezelfde patiënt weer naar huis gaat genomen. Omdat de behandeltijd geen wachttijd is, worden de momenten dat de patiënt behandeld is er vanaf gehaald.
$$min \left[\sum_j \left(s_j^{max} - s_j^{min} - \sum_p \sum_i L_{jp} \cdot x_{ijp} \right) \right] \tag{3}$$

4. De tijd dat een behandelaar niets te doen heeft, terwijl die behandelaar op het centrum aanwezig is, moet minimaal zijn. Hoe belangrijk het is dat deze tijd minimaal is, wisselt per behandelaar. Van de artsen uit het basisteam wordt immers verwacht dat ze de hele dag op het centrum zijn, die zullen daar dus zelf rekening mee houden. Drukbezette behandelaars die echter voor twee afspraken naar het centrum komen, zullen de wens hebben dat deze afspraken direct na elkaar zijn. Een MRI-scan zal het echter veel minder uitmaken hoeveel patiënten met een neuromusculaire

aandoening er komen, omdat deze niet alleen door patiënten van het centrum gebruikt worden.

Deze minimalisatie lijkt veel op de vorige:

$$min \left[\sum_k W_k \cdot \left(s_k^{max} - s_k^{min} - \sum_j \sum_p \sum_i L_{jp} \cdot z_{ijkp} \right) \right] \tag{4}$$

5. Het aantal gewogen extra patiënten dat ingepland wordt moet maximaal zijn.

$$max \sum_j e_j \cdot \beta_j \tag{5}$$

Als er vervolgens naar de doelfunctie als geheel gekeken wordt, is het van belang dat er goede weegfactoren aan de verschillende onderdelen worden gegeven. Dit is omdat de verschillende onderdelen een andere orde van grootte hebben. Daarom zijn er doelfunctieconstantes ingevoerd, die veranderd kunnen worden, mochten de prioriteiten van bepaalde onderdelen veranderen. De variabelen die hiervoor gebruikt worden zijn κ, θ, γ, ϵ en δ. Deze wegingen staan samen met w en β in tabel 7, waar ook aangegeven staat waar de wegingen bij horen. De bepaling van de doelfunctieconstantes zal gedaan worden met informatie uit het AMC, zie hiervoor paragraaf 4.1.2. De verschillende doelfuncties in combinatie met de doelfunctieconstantes komen allemaal samen in onderstaande doelfunctie. In bovenstaande doelfuncties wordt er soms gemaximaliseerd en soms geminimaliseerd. In deze complete doelfunctie zijn de minimumfuncties omgeschreven naar maximumfuncties door middel van het vermenigvuldigen met min één.

$$\begin{aligned} max \qquad & \kappa \cdot \textstyle\sum_j g_j \cdot \beta_j + \theta \cdot \sum_i \sum_j \sum_p x_{ijp} \cdot (2Q_{jp} + 1) \cdot L_{jp} \\ & -\gamma \cdot \left[\textstyle\sum_j \left(s_j^{max} - s_j^{min} - \sum_p \sum_i L_{jp} \cdot x_{ijp} \right) \right] \\ & -\epsilon \cdot \left[\textstyle\sum_k w_k \cdot \left(s_k^{max} - s_k^{min} - \sum_j \sum_p \sum_i L_{jp} \cdot z_{ijkp} \right) \right] \\ & -\delta \cdot \textstyle\sum_j e_j \cdot \beta_j \end{aligned} \tag{6}$$

Tabel 7: wegingsfactoren

Parameter	Betekenis
κ	Wegingsfactor doel 1
θ	Wegingsfactor doel 2
γ	Wegingsfactor doel 3
ε	Wegingsfactor doel 4
δ	Wegingsfactor doel 5
β	Weging van een patiënt, afhankelijk van hoe lang een patiënt al staat te wachten en of een patiënt al begonnen is met zijn behandeling
w	Vector waarin de wegingsfactoren van de behandelaars staat. Het element w_k geeft aan hoe belangrijk het is dat behandelaar k geen gaten in zijn rooster heeft.

3.2.3 Randvoorwaarden

Hier worden de randvoorwaarden van het ILP besproken. Eerst is er een korte uitleg, vervolgens de wiskundige notatie en tenslotte voor welke waarden deze voorwaarde moet worden voldaan (bijvoorbeeld alle i). Bij het bepalen van deze randvoorwaarden is gebruik gemaakt van Chern, Chien en Chen.[1]

1. Een behandelaar kan maar aan één procedure per tijdstip tegelijk beginnen.
$$\sum_p \sum_j z_{ijkp} \leq 1 \quad \forall i, k \tag{7}$$

2. Er worden alleen afspraken gepland waar de patiënt behoefte aan heeft.
$$-L_{jp} + \sum_i x_{ijp} \leq 0 \quad \forall j, p \tag{8}$$

3. Een patiënt hoeft per dag een procedure maximaal één keer te ondergaan.
$$\sum_i x_{ijp} \leq 1 \quad \forall j, p \tag{9}$$

4. Een procedure bij een patient wordt uitgevoerd door een behandelaar die de bevoegdheid heeft deze behandeling uit te voeren. Om een behandelaar aan een patiënt te kunnen koppelen wordt gebruik gemaakt van de matrix D, waarin af te lezen is welke behandelaar welke procedure kan uitvoeren. [1] Door te sommeren over de behandelaars wordt gegarandeerd dat precies

[1] Sommige procedures kunnen door meerdere behandelaars worden uitgevoerd, dit kan dan ook in deze matrix verwerkt worden. Zo kunnen er bijvoorbeeld twee bloedprikkers opgenomen worden, die beide de procedure bloedprikken kunnen uitvoeren. Ook zijn er behandelaars die verschillende procedures kunnen uitvoeren.

één behandelaar ingepland wordt als de patiënt ingepland staat voor een procedure. Hierbij moeten in gedachte gehouden worden dat x_{ijp} een binaire variabele is.

$$\sum_k (z_{ijkp} \cdot D_{kp}) = x_{ijp} \quad \forall i, j, p \tag{10}$$

5. Een patiënt krijgt niet meer behandeltijd op een dag dan dat deze patiënt aankan.Voor een patiënt j geeft a_j aan hoeveel tijdsloten aan behandelingen (exclusief pauzes) deze patiënt op een dag maximaal aankan.

$$-a_j + \sum_i \sum_p x_{ijp} L_{jp} \leq 0 \quad \forall j \tag{11}$$

6. Er worden alleen patiënten ingepland die volledig ingepland zijn, of als extra patiënt naar het centrum komen:

$$\sum_i \sum_p x_{ijp} - M_{10}(g_j + e_j) \leq 0 \quad \forall j \tag{12}$$

7. Een behandelaar heeft op een dag tenminste zoveel behandelingen als van te voren is aangegeven, namelijk b_k. Het alternatief is dat deze behandelaar niet komt. Een arts k heeft tenminste b_k behandelingen of natuurlijk geen. Hierbij zal het voor onderzoeken bij bijvoorbeeld een prikpost niet uitmaken en dus zal de b-waarde voor de bloedprikkers gelijk zijn aan nul. De variabele y_k geeft aan of een arts aanwezig is op het centrum of niet. Het eerste deel van de voorwaarde verzekert dat als een behandelaar niet aanwezig is, deze ook geen afspraken heeft staan. M_3, net als de vorige M_i's, is een groot getal. In dit geval is het aantal tijdsloten genoeg, een behandelaar heeft immers niet meer afspraken dan dat er tijd op een dag is.

$$M_3 \cdot y_k - \sum_i \sum_j \sum_p z_{ijkp} \geq 0 \quad \forall k \tag{13}$$

   Het tweede deel van deze voorwaarde verzekert dat als een arts naar het centrum komt, deze tenminste het aantal afspraken heeft dat aangegeven is.

$$\sum_i \sum_j \sum_p z_{ijkp} - b_k \cdot y_k \geq 0 \quad \forall k \tag{14}$$

8. Twee afspraken vinden alleen tegelijkertijd plaats als van te voren is aangegeven dat dit mag. In het geval van het NMA centrum wil men graag carrousselconsulten, waarbij twee artsen met een vergelijkbare discipline tegelijkertijd een consult met de patiënt hebben. Op deze manier hoeft een patiënt niet onnodig bepaalde handelingen twee keer te doen. Deze voorwaarde is ook van belang om te zorgen dat afspraken geen overlap hebben als ze niet tegelijkertijd mogen plaatsvinden. Met andere woorden, zolang procedure

q duurt mag procedure p niet starten, en het omgekeerde geldt ook. De matrix K geeft aan welke procedures tegelijk kunnen. Het element K_{pq} is nul als ze niet tegelijk kunnen, en het is éen als ze wel tegelijk kunnen. Merk hierbij op dat op de diagonalen altijd enen moeten staan. Dit geeft de volgende voorwaarde:

$$\sum_{a=i}^{i+L_{jq}-1} x_{ajp} + \sum_{a=i}^{i+L_{jp}-1} x_{ajq} - 1 - K_{pq} \leq 0 \quad \forall i, j, p, q \tag{15}$$

9. Sommige patiënten zullen niet alle afspraken op één dag kunnen hebben omdat ze meer noodzakelijke afspraaktijd hebben dan ze per dag aankunnen. De afspraken van deze patiënten worden dan over meerdere dagen verdeeld, maar dan moeten er op die verschillende dagen wel genoeg afspraken gepland worden om later niet in de problemen te komen. Van te voren is besloten dat de afspraken van een patiënt over α dagen verspreid zullen worden. Als een patiënt voor de eerste van zijn α dagen komt, moet deze patiënt tenminste een fractie $1/\alpha$ van zijn afspraken hebben, gemeten in de totale tijd van de afspraken. Op de eerste dag is er immers nog keus uit alle afspraken, dus moet het mogelijk om er een heel aantal in te plannen. Pas later zullen er misschien problemen komen met de overgebleven afspraken. Als een nieuwe patiënt geaccepteerd is wordt dus aan de volgende voorwaarde voldaan:

$$g_j = 1 \quad \Rightarrow \quad \alpha_j \cdot \frac{\sum_i \sum_p x_{ijp} L_{jp}}{\sum_p L_{jp}} \geq 1 \tag{16}$$

Als de patiënt er niet aan voldoet, dan $g_j = 0$ en is de patiënt niet geaccepteerd. Het gaat hier over de tijd die voor een patiënt moet worden ingepland, niet het aantal afspraken. Dit geeft de volgende voorwaarde:

$$g_j \cdot \sum_p L_{jp} - \alpha_j \sum_i \sum_p x_{ijp} L_{jp} \leq 0 \quad \forall j \tag{17}$$

Er moet in het achterhoofd gehouden worden dat patiënten alleen ingepland worden als ze een volledig ingeplande patiënt zijn, of een extra patiënt.

10. Er zit voldoende tijd tussen twee ingeplande afspraken. Het kan bijvoorbeeld noodzakelijk zijn dat de uitslag van een onderzoek binnen is voordat een consult plaatsvindt. Als het twee uur duurt voor deze uitslag binnen is, dan mag het consult op zijn vroegst twee uur na het aflopen van het onderzoek beginnen. De volgende voorwaarde zorgt ervoor dat als voor een patiënt j een tweetal procedures p, q gepland is, de variabele c_{jpq} gelijkgesteld wordt aan één. De waarde 1.8 is gekozen omdat $1.8 \in (1, 2)$, maar een willekeurige andere waarde uit dat interval volstaat ook. Bij het bepalen van deze randvoorwaarde is gebruik gemaakt van het boek van

Winston.[6] M_4 is hier drie maal het aantal tijdsloten.

$$\sum_i (x_{ijp} + x_{ijq}) - 1.8 - M_4 \cdot c_{jpq} \leq 0 \quad \forall j, p, q$$

Vervolgens moet er voldoende tijd tussen twee geplande afspraken zitten. De volgende uitdrukking geeft aan hoeveel tijd er tussen de twee procedures p, q zit:

$$\sum_i i\,(x_{ijp} - x_{ijq})$$

Voor sommige combinaties van afspraken is er een voorwaarde, voor andere niet. De matrix $T1$ geeft aan of er een relatie is. Als $T1_{pq} = 0$, dan is er geen restrictie. Als $T1_{pq} = 1$, dan moet afspraak q na afspraak p. De matrix $T2$ die geeft aan hoeveel tijd er tussen twee afspraken moet zitten. Hierbij gaat het om de tijd tussen het aflopen van de eerste afspraak en het starten van de tweede afspraak. Deze hoeft niet gedefinieerd te worden voor elementen waar $T1_{pq} = 0$. Als afspraak q alleen maar na p hoeft en er geen tijd tussen hoeft te zitten, dan $T2_{pq} = 0$. Als er wel tijd tussen moet zitten is de waarde van $T2_{pq}$ het aantal tijdsloten dat er tussen p en q moet zitten. De volgende tijd moet minimaal tussen het starten van procedures p en q zitten, indien procedure p eerst plaatsvindt:

$$L_{jp} + T1_{pq} \cdot T2_{pq} + (T1_{pq} - 1) \cdot M_6$$

Hierbij is M_6 een getal dat groot genoeg is om bovenstaande uitdrukking klein genoeg te maken. In dit geval is het ruim voldoende als M_6 twee keer het totaal aantal tijdsloten is. De voorwaarde die zorgt dat er genoeg tijd tussen twee afspraken zit is dan als volgt:

$$\sum_i i \cdot (x_{ijq} - x_{ijp}) - L_{jp} - T1_{pq} \cdot T2_{pq} - (T1_{pq} - 1) \cdot M_6 + (1 - c_{jpq}) \cdot M_4 \geq 0 \quad \forall j, p, q \tag{18}$$

11. Een behandelaar moet tijd hebben voor een afspraak. Als de behandelaar niet beschikbaar is, bijvoorbeel omdat deze al een andere afspraak heeft, dan mag er geen nieuwe afspraak ingepland worden. Het eerste deel van deze voorwaarde, zie formule (19) (met R_{ak}), kijkt of de behandelaar tijdens de periode van de nieuwe afspraak op het centrum aanwezig is. Als dat zo is, dan is deze som gelijk aan nul. Het tweede deel van (19) (met z_{ajkp}) kijkt of er tijdens de periode van de afspraak geen andere afspraken starten. Als deze er niet zijn, dan is de som gelijk aan nul. Als er dus ruimte is voor een afspraak, dan is het gedeelte voor het minteken gelijk aan nul. Als de nieuwe afspraak gepland is, dan is het derde gedeelte nul en moet daarmee ook de rest nul zijn. Als de nieuwe afspraak niet gepland is, dan is het derde gedeelte tenminste één. Om te zorgen dat de voorwaarde niet nul blijft moet M_1 een groot getal zijn. Waarbij in dit

geval het voldoende is om het aantal patiënten, vermenigvuldigd met het aantal procedures en het aantal tijdsloten te nemen.

$$\sum_j \sum_p \left[\sum_{a=i}^{i+L_{jp}-1} (1 - R_{ak}) + \sum_{a=i+1}^{i+L_{jp}-1} z_{ajkp} \right] - M_1 \cdot (1 - \sum_j \sum_p z_{ijkp}) \leq 0 \quad \forall i, k \tag{19}$$

12. Om er voor te zorgen dat er geen afspraken worden gepland bij artsen terwijl deze nog met de vorige afspraak bezig zijn, is deze voorwaarde toegevoegd. Hier wordt met de eerste som bekeken of er voor patiënt j een afspraak begint bij arts k voor procedure p op een bepaalde tijd. Hier komt een nul of een één te staan. In de tweede som wordt gekeken of er voor patiënt $j2$ een afspraak begint bij arts k voor procedure q voor een bepaalde tijd. Deze voorwaarde zorgt er voor dat als de tijd overlapt er bij dezelfde dokter nooit twee patiënten voor de deur kunnen staan.

$$\sum_{a=i}^{i+L_{j2q}-1} z_{ajkp} + \sum_{a=i}^{i+L_{jp}-1} z_{aj2kq} - 1 \leq 0 \quad \forall i, k, p, q, j, j2_{/j=j2 \cap p=q} \tag{20}$$

13. Definieer de start- en eindtijden van patiënten en behandelaars. Deze randvoorwaarden vormen voor de starttijden een minumum functie, er wordt gezocht naar het eerste tijdslot waarvoor er afspraken zijn. Het is ook mogelijk dat dit getal kleiner is dan de daadwerkelijke starttijd, maar doordat deze starttijd gemaximaliseerd zal gaan worden zal uiteindelijk toch precies de starttijd aangenomen worden. Voor het eindtijdstip geldt een vergelijkbare redenatie. De M_2 is een groot getal, in dit geval is het aantal tijdsloten op een dag voldoende.

$$s_j^{min} \leq M_2 + (i - M_2)\, x_{ijp} \quad \forall i, j, p \tag{21}$$

$$s_j^{max} \geq (i + L_{jp})\, x_{ijp} \quad \forall i, j, p \tag{22}$$

$$s_k^{min} \leq M_2 + (i - M_2)\, z_{ijkp} \quad \forall i, j, k, p \tag{23}$$

$$s_k^{max} \geq (i + L_{jp})\, z_{ijkp} \quad \forall i, j, k, p \tag{24}$$

14. Voor patiënten die (nog) maar één dag hoeven te komen is het natuurlijk optimaal als al hun afspraken op één dag gepland kunnen worden. Het kan echter ook zo zijn dat de meeste afspraken wel gepland kunnen worden, maar dat het niet lukt om de laatste te plannen. Zulke patiënten worden, zolang het niet ten koste gaat van patiënten die volledig zijn ingepland, alsnog ingepland. Als zo'n patiënt wordt ingepland, dan $e_j = 1$, anders $e_j = 0$. Er is maar een beperkt aantal patiënten dat in aanmerking komt als extra patiënt. Een eerste voorwaarde hiervoor is dat een patiënt (nog) maar één dag aan behandelingen nodig heeft:

$$\alpha_j - 1 \leq M_8(1 - e_j) \quad \forall j$$

Daarnaast is een volledig behandelde patiënt geen extra patiënt:

$$g_j + e_j \leq 1 \quad \forall j$$

Verder is het de vraag wanneer het beter is een patiënt deels in te roosteren als extra patiënt, en wanneer deze patiënt beter een maand kan wachten tot de volgende dag waar die patiënt misschien volledig behandeld zou kunnen worden. Neem daarom o_j als het aantal afspraken dat van patiënt j over mag blijven, en die dan nog op een andere dag gepland zullen moeten worden. Als er meer afspraken overblijven dan de gegeven waarde in o, is het beter dat de patiënt een andere dag komt. Om dit te kunnen berekenen is het noodzakelijk om te weten hoeveel afspraken er in totaal gewenst zijn. Hiervoor is dus een technische truc nodig om de $[0, 1]$ matrix $L2$ te maken, de matrix die aangeeft of een patient behoefte heeft aan een afspraak of niet. Als een procedure gevraagd is, dus als $L_{jp} > 0$, dan $L2_{jp} = 1$.

$$L_{jp} \leq M_7 \cdot L2_{jp} \quad \forall j, p$$

Als een procedure niet gevraagd is, dus als $L_{jp} = 0$, dan $L2_{jp} = 0$.

$$L_{jp} \geq L2_{jp} \quad \forall j, p$$

Ook wordt er aangegeven dat alle waarden in de matrix L2 gehele getallen moeten zijn.Vervolgens wordt op deze manier bepaald of het wenselijk is dat een patiënt als extra patiënt in te plannen

$$o_j - \sum_p L2_{jp} - \sum_p \sum_i x_{ijp} + M_9(1 - e_j) \geq 0 \quad \forall j \tag{25}$$

3.2.4 Samenvatting doelen en randvoorwaarden

In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de besproken doelen en randvoorwaarden. Bij de randvoorwaarden wordt onderscheid gemaakt tussen technische randvoorwaarden en wenselijke randvoorwaarden.

Doelen

- Het gewogen aantal volledig ingeplande patiënten wordt gemaximaliseerd
- De behandeltijd voor een patiënt per dag wordt gemaximaliseerd
- De tijd dat een patiënt moet wachten terwijl deze patiënt in het ziekenhuis is, wordt geminimaliseerd
- De tijd dat een behandelaar niets te doen heeft, terwijl deze behandelaar op het centrum aanwezig is, wordt geminimaliseerd
- Het aantal gewogen patiënten dat als extra wordt ingepland wordt gemaximaliseerd

Technische randvoorwaarden

- Een behandelaar kan maar aan één procedure per tijdstip tegelijk beginnen.
- Er worden alleen afspraken gepland waar de patiënt behoefte aan heeft.
- Een patiënt hoeft per dag een procedure maximaal één keer te ondergaan.
- Een procedure bij een patient wordt uitgevoerd door een behandelaar die de bevoegdheid heeft deze behandeling uit te voeren.
- Er worden alleen patiënten ingepland die volledig ingepland zijn, of als extra patiënt naar het centrum komen
- Twee afspraken vinden alleen tegelijkertijd plaats als van te voren is aangegeven dat dit mag
- Er zit voldoende tijd tussen twee ingeplande afspraken.
- Een behandelaar moet beschikbaar zijn voor een afspraak.

Wenselijke randvoorwaarden

- Een patiënt krijgt niet meer behandeltijd op een dag dan dat deze patiënt aankan.
- Een behandelaar heeft op een dag tenminste zoveel behandelingen als van te voren is aangegeven
- De afspraken van patiënten die niet op één dag passen worden verdeeld over meerdere dagen
- Patiënten waarvan een beperkt aantal afspraken niet meer ingepland kan worden, worden ingepland als extra patiënt

3.3 Tijdlijn toegangstijden

Om de toegangstijden van zowel het diagnosetraject alsmede het follow-up traject beter te kunnen modelleren wordt het model opgesplitst in twee delen: het diagnosetraject en het follow-up traject. Voor beide trajecten moet een aparte wachttijdenanalyse gemaakt worden. In dit verslag wordt door tijdgebrek alleen het diagnosetraject behandeld.

Eerst zal een korte samenvatting van het traject gegeven worden, waarbij zal worden uitgelegd hoe de wachttijd van een patiënt is opgebouwd.

Vervolgens worden er toestanden gedefinieerd die aangeven hoeveel patiënten er op een bepaald moment wachten. Dit zal eerst gebeuren voor een vaste capaciteit die onafhankelijk is van het aantal wachtende patiënten. Vervolgens zal het aantal patiënten dat behandeld wordt een vast aantal zijn dat afhankelijk is van het aantal wachtende patiënten, en tenslotte is de capaciteit stochastisch.

Met de vaste capaciteit die onafhankelijk is van het aantal wachtenden zal verdergegaan worden in de wachttijdenanalyse. Er zal een kansverdeling opgesteld worden voor de tijd die patiënten moeten wachten.

3.3.1 Tijdlijn diagnosetraject

Het doel is om de toegangstijd van een patiënt voor een diagnosedag te schatten. In dit geval wordt met de toegangstijd de tijd bedoeld tussen het ontvangen van de vragenlijst in het ziekenhuis tot de daadwerkelijke dag dat de patiënt naar het ziekenhuis toekomt. Deze toegangstijd is onder te verdelen in drie stukken:

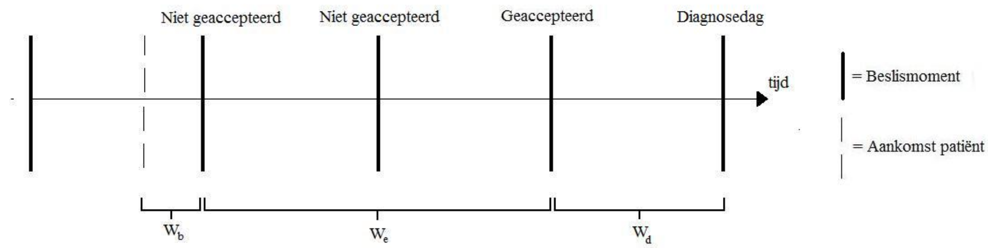
- De tijd tot het eerstvolgende beslismoment, W_b. Op zo'n beslismoment wordt besloten welke patiënten in aanmerking komen voor een diagnosedag. Er wordt dan meteen een planning gemaakt voor de volgende diagnosedag, waaruit volgt welke patiënten die diagnosedag mogen komen. .

- De tijd die ontstaat door andere patiënten in het systeem, W_e. Soms zijn er veel andere patiënten die nog wachten op een diagnosedag, en die dus in principe voorgaan. Ook kan het zijn dat er niet genoeg patiënten zijn om een diagnosedag te kunnen vullen.

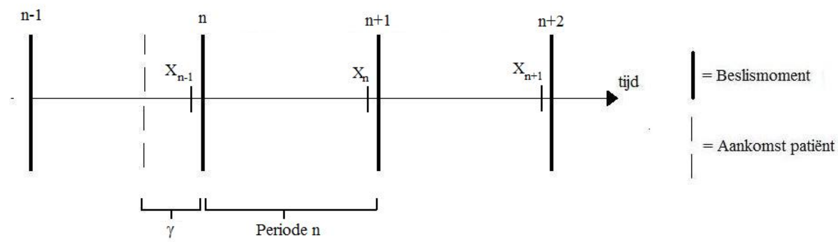
- De tijd tussen een beslismoment en de eerstvolgende diagnosedag, W_d. Zodra het AMC heeft bepaald wanneer een patiënt kan komen, duurt het nog wel een aantal weken voordat de diagnosedag daadwerkelijk plaatsvindt.

De toegangstijd van een patiënt is dus $W = W_b + W_d + W_e$.

Figuur 2: Schematische weergave toegangstijden



(a)



(b)

Hierbij zijn W_b en W_d onafhankelijk van andere patiënten. W_b is alleen afhankelijk van het tijdstip waarop een patiënt binnen komt. Zodra een patiënt is binnengekomen duurt het nog γ deel van een periode tot het eerstvolgende beslismoment. Bovenstaande is samengevat in figuur 2(a). Als voorbeeld voor de wachttijden is een patiënt gekozen die aan het eind van een periode binnenkomt. Deze patiënt wordt twee maal afgewezen, maar op het derde beslismoment geaccepteerd voor een diagnosedag. Vervolgens duurt het nog een maand voordat de patiënt daadwerkelijk in het AMC behandeld wordt. Zijn totale wachttijd is in dit geval dus ruim drie maanden.

W_d is deterministisch omdat de tijd tussen een beslismoment en een eerstvolgende diagnosedag alleen afhankelijk is van de keuze van het AMC. Deze tijd zal nagenoeg constant zijn.

De patiënten komen binnen volgens een Poissonproces, dat wil zeggen dat ze onafhankelijk van elkaar binnenkomen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een gemiddeld aantal patiënten per jaar λ. Ook wordt er vanuit gegaan dat er in principe α diagnosedagen zullen zijn per jaar. Een aantal hiervan zal niet doorgaan vanwege een te laag aantal patiënten. De periode tussen twee diagnosedagen is $1/\alpha$ jaar. Doordat de aankomsten onafhankelijk zijn, heeft γ een uniforme verdeling.

Om W_e te kunnen bepalen, zal deze gemodelleerd worden met behulp van een discrete tijd Markovketen. Hierbij stellen de toestanden X_n het aantal patiënten in de wachtrij aan het eind van periode n voor. Dat is het moment vlak voor het beslismoment $n+1$, zie ook figuur 2(b). Het 'first come, first serve' principe wordt gehanteerd: een patiënt die eerder een verzoek indient voor een diagnosedag dan een andere patiënt, wordt indien mogelijk ook eerder ingepland.[2] Het aantal patiënten dat op een diagnosedag behandeld wordt is s. Voor elke toestand X_n zullen de limietkansen berekend worden om vervolgens de verwachte waarde van W_e te berekenen en daarmee de verwachte toegangstijd tot het systeem te bepalen.

De verschillende variabelen worden samengevat in tabel 8.

Tabel 8: Variabelen wachttijdenanalyse

Variabele	Betekenis
λ	Gemiddeld aantal patiënten per jaar
α	Aantal mogelijke diagnosedagen per jaar
X_n	Het aantal wachtende patiënten aan het eind van een periode
Y_n	Het aantal wachtende patiënten aan het begin van een periode
W_b	De wachttijd tot het eerstvolgende beslismoment
W_e	De wachttijd tot het geaccepteerd worden voor een diagnosedag
W_d	De wachttijd vanaf het geaccepteerd worden tot de daadwerkelijke diagnosedag
$1-\gamma$	De fractie van een periode die het duurt vanaf het ontvangen van de vragenlijst tot het eerste beslismoment
$A_{m,n}$	Het aantal patiënten dat in m periodes binnenkomt, startende in periode n
s	Het aantal patiënten dat op een diagnosedag behandeld wordt

3.4 Markovketens

3.4.1 Overgangskansen en stationaire verdelingen

In eerste instantie wordt er vanuit gegaan dat er een vast aantal patiënten op een diagnosedag onderzocht wordt. In deze paragraaf zullen de verschillende overgangskansen geanalyseerd worden. Tussen twee beslismomenten kunnen er nieuwe patiënten binnenkomen, die in aanmerking komen voor een diagnosedag. Er wordt vanuit gegaan dat de patiënten aankomen volgens een Poissonproces. Het gemiddeld aantal patiënten per jaar die in aanmerking komen voor een diagnosedag is λ. De kans dat er in een periode met lengte t precies a patiënten binnenkomen is als volgt:

$$P(A=a) = e^{-\lambda t}\frac{(\lambda t)^a}{a!}$$

Aangenomen wordt dat de α diagnosedagen per jaar goed zijn gespreid over het jaar, dus $t = 1/\alpha$. Omdat er in latere afleidingen gebruik gemaakt gaat worden van het aantal aankomsten in meerdere periodes moet hier een geschikte notatie

[2] In praktijk zal dit niet altijd mogelijk zijn. Soms kunnen namelijk patiënt 1 en 2 in de wachtrij niet samen ingepland worden, terwijl patiënt 1 en 3 wel samen ingepland kunnen worden. In dat geval zal patiënt 2 dus wat langer moeten wachten.

voor worden ingevoerd. Neem n als het begin van periode n. Het getal m geeft dan aan in hoeveel periodes de patiënten mogen aankomen. Dus $A_{m,n}$ is het aantal patiënten dat in m periodes aankomt te beginnen bij periode n. Dit geeft de volgende kans:

$$P(A_{m,n} = a) = e^{-\frac{m \cdot \lambda}{\alpha}} \frac{(\frac{m \cdot \lambda}{\alpha})^a}{a!} \tag{26}$$

Zodra er gesproken wordt over stationaire kansen zal de index n weggelaten worden.

Het aantal patiënten dat op een gegeven moment n in de rij staat is gedefiniëerd als X_n. Er zullen alleen patiënten 'vertrekken', oftewel behandeld worden, als er genoeg patiënten wachten op een diagnosedag om deze te kunnen organiseren. $A_{1,n}$ is het aantal patiënten dat in periode n is binnengekomen en s is de capaciteit, oftewel het aantal patiënten dat op een diagnosedag onderzocht wordt. Deze hoeveelheid X_n kan als volgt worden beschreven:

$$X_n = \begin{cases} X_{n-1} - s + A_{1,n} & \textit{voor } X_{n-1} \geq s \\ X_{n-1} + A_{1,n} & \textit{voor } X_{n-1} < s \end{cases}$$

De kans op $X_n = x$ kan als volgt genoteerd worden:

$$P(X_n = x) = \sum_{y=0}^{\infty} P(X_n = x \mid X_{n-1} = y) \cdot P(X_{n-1} = y)$$

Gegeven de kansverdeling van het aantal patiënten in de vorige toestand en de overgangskansen kan de kansverdeling voor het aantal patiënten in de huidige toestand bepaald worden. Als de overgangskansen bekend zijn, kan de stationaire verdeling berekend worden.

Voor het bepalen van de overgangskansen kan er onderscheid gemaakt worden tussen twee gevallen:

- Vorige periode is er niemand geaccepteerd voor een diagnosedag, dus voor $y < s$:

$$P(X_n = x \mid X_{n-1} = y) \quad = \begin{cases} P(A_{1,n} = x - y) & \textit{voor } x \geq y \\ 0 & \textit{voor } x < y \end{cases}$$

- Vorige periode zijn er s patiënten geaccepteerd voor een diagnosedag, dus voor $y \geq s$:

$$P(X_n = x \mid X_{n-1} = y) \quad = \quad \begin{cases} P(A_{1,n} = x - y + s) & \textit{voor } x \geq y - s \\ 0 & \textit{voor } x < y - s \end{cases}$$

Deze overgangskansen worden gegeven in de matrix P, de overgangsmatrix. Met behulp van deze overgangsmatrix kan de stationaire verdeling berekend worden, oftewel de limietkansen voor het aantal patiënten dat aan het einde van een periode wacht op behandeling. De stationaire verdeling wordt gegeven door de vector π, die wordt berekend door het volgende stelsel vergelijkingen op te lossen:

$$\begin{array}{rcl} \pi & = & \pi P \\ \sum_i \pi_i & = & 1 \end{array}$$

De stationaire kans $\lim_{n\to\infty} P(X_n = x)$ wordt dan gegeven door π_x.

Vaste capaciteit afhankelijk van het aantal wachtende patiënten

Tot nu toe is er steeds gesproken over een vast aantal patiënten per dag dat onafhankelijk is van het aantal wachtende patiënten. Het is echter goed denkbaar dat het handig is om veel patiënten tegelijk te behandelen als de wachtrij lang is, en dat er beter minder patiënten behandeld kunnen worden als de wachtrij erg kort is. Neem c_{min} als het minimale aantal patiënten dat op een dag behandeld moet worden, en c_{max} als het maximale aantal patiënten dat op een dag behandeld kan worden. De overgangskansen veranderen dan als volgt:

- Vorige periode is er niemand geaccepteerd voor een diagnosedag, dus voor $y < c_{min}$:

$$P(X_n = x \mid X_{n-1} = y) \quad = \quad \begin{cases} P(A_{1,n} = x - y) & voor\ x \geq y \\ 0 & voor\ y < c_{min},\ x < y \end{cases}$$

- Vorige periode zijn er patiënten geaccepteerd voor een diagnosedag, dus voor $c_{min} \leq y$:

$$P(X_n = x \mid X_{n-1} = y) \quad = \begin{cases} P(A_{1,n} = x) & voor\ c_{min} \leq y \leq c_{max},\ x \geq 0 \\ P(A_{1,n} = x - y + c_{max}) & voor\ y > c_{max},\ x \geq y - c_{max} \\ 0 & oor\ y > c_{max},\ x < y - c_{max} \end{cases}$$

Het bepalen van de stationaire verdeling gaat op dezelfde manier als bij een vast aantal patiënten per diagnosedag.

Stochastische capaciteit

Omdat iedere patiënt een verschillend aantal afspraken kan hebben, zal er niet altijd hetzelfde aantal patiënten op een diagnosedag behandeld kunnen worden. Daarom zal bij het berekenen van de verwachte toegangstijd voor een diagnosedag rekening moeten worden gehouden met een stochastische capaciteit.

Om hiermee rekening te houden zullen er overgangskansen, $P(X_n = x|X_{n-1} = y)$, bepaald moeten worden. Om de overgangskansen te kunnen bepalen moet de capaciteit van een diagnosedag bepaald worden.

De kans dat op een diagnosedag h patiënten kunnen komen, gegeven dat er geprobeerd is g patiënten in te plannen, is als volgt:

$$P(H = h|G = g) = f_{gh}$$

Een mogelijkheid om deze kansen te schatten is door het planningsmodel vele malen roosters te laten genereren met verschillende combinaties patiënten. Als de hierbovenstaande kansen bekend zijn, is het mogelijk om de overgangskansen in dit model te bepalen. Er zal er altijd geprobeerd worden alle wachtenden in te plannen, waarbij nog wel aan de voorwaarden moet worden voldaan. Dat wil zeggen dat er tenminste c_{min} patiënten ingepland moeten worden. Dit heeft als gevolg dat $f_{gh} = 0$ voor alle $h < c_{min}$.
Bij de overgangskansen zijn twee gevallen te onderscheiden:

$$P(X_n = x | X_{n-1} = y) = \begin{cases} \sum_{i=y-x}^{y} f_{yi} \cdot P(A_n = i + x - y) & \text{voor } x < y \\ \sum_{i=0}^{y} f_{yi} \cdot P(A_n = i + x - y) & \text{voor } x \geqslant y \end{cases}$$

Wat deze vergelijkingen in het kort zeggen is dat het verschil in aantal patiënten tussen de toestanden gelijk moet zijn aan het aantal nieuwe patiënten minus het aantal behandelde patiënten, en dit moet gelden voor elke moge-
lijke capaciteit van een diagnosedag. De stationaire verdeling wordt vervolgens gegeven door de vector π, die wederom wordt berekend door het volgende stelsel vergelijkingen op te lossen:

$$\begin{aligned} \pi &= \pi P \\ \sum_i \pi_i &= 1 \end{aligned}$$

De stationaire kans $P(X = x)$ wordt dan gegeven door π_x.

3.4.2 Wachttijd van een aankomende patiënt

Met behulp van de stationaire verdeling van X zal de kansverdeling van de wachttijd van een patiënt worden berekend. In de volgende analyse van dit probleem wordt er vanuit gegaan dat er een vast aantal patiënten s per dag behandeld wordt, onafhankelijk van het aantal wachtenden.

De op te stellen kansverdeling van het aantal maanden wachttijd is gebaseerd op de wachttijd vanaf het eerste beslismoment dat een patiënt wellicht ingepland zou kunnen worden, tot het moment dat deze patiënt geaccepteerd wordt voor een diagnosedag. Dit is de eerder gedefinieerde W_e. Deze wachttijd wordt gemeten in periodes, waarbij deze periodes in dit onderzoek gelijk zullen zijn aan een maand. Deze wachttijd zal gecorreleerd zijn aan W_b, de wachttijd tot het eerste beslismoment. In de analyse is dit verband wegens tijdgebrek echter niet meegenomen. De variabelen staan ook toegelicht in figuur 2 op pagina 26.

$P(X_{n-1} = x)$ is de kans dat er aan het eind van de periode $n-1$ precies x patiënten wachten. Neem $P(Y_n = y)$ als de kans dat er aan het begin van een periode n precies y patiënten blijven wachten, waarbij y direct op x volgt. De stationaire verdeling van Y is dan als volgt:

$$P(Y = i) = \begin{cases} P(X = i) + P(X = i + s) & \text{voor } i < s \\ P(X = i + s) & \text{voor } i \geq s \end{cases}$$

Renewal Reward Processes

Bij het opstellen van de kansverdeling wordt gebruik gemaakt van zogenaamde "Renewal Reward Processes", een belangrijk model in vernieuwingstheorie. Deze theorie zal hier niet uitgebreid behandeld worden, voor meer informatie hierover wordt verwezen naar het boek van Ross.[4] Het idee achter deze theorie is dat de tijd opgedeeld kan worden in periodes. De aankomsten in een periode zijn onafhankelijk van de aankomsten in de andere periodes. Stel nou dat het systeem aan het begin van een periode nog een plaats voor de eerstvolgende diagnosedag vrij heeft. Er is dus één patiënt blij te maken, bekijk dit als het uitdelen van één muntje. Deze patiënt krijgt dus een 'beloning' voor het als eerste aankomen. Neem T als een lange tijdsperiode die is opgedeeld in verschillende slots. Noteer $N_1(T)$ als het aantal patiënten, gedurende een tijd T, die als eerste binnen een slot aankomen. Neem $N(T)$ als het aantal patiënten dat gedurende T in totaal is aangekomen. Dan volgens de Renewal Reward Processes:

$$\lim_{T\to\infty} \frac{N_1(T)}{N(T)} = \frac{E(\text{beloning per slot})}{E(\text{aantal aankomsten per slot})} = \frac{E(N_1(1))}{E(N(1))} = \frac{P(A_{1,n} \geq 1)}{\lambda/\alpha}$$

Dat wil zeggen dat op de lange termijn de fractie van patiënten die als eerste in een tijdslot aankomt gelijk is aan de kans dat er tenminste één patiënt aankomt, gedeeld door het aantal patiënten dat gemiddeld in een periode aankomt. Het gemiddelde aantal patiënten in een periode is gelijk aan het aantal patiënten in een jaar, gedeeld door het aantal periodes in een jaar.

In de volgende afleidingen wordt er eerst vanuit gegaan dat er een vaste capaciteit van twee patiënten is. Vervolgens zal deze capaciteit worden uitgebreid naar een vast aantal van s patiënten.

De fractie patiënten die niet hoeft te wachten

Patiënten die niet hoeven te wachten, zijn patiënten die op het eerste beslismoment na binnenkomst meteen worden ingepland voor de volgende diagnosedag. Deze fractie patiënten wordt berekend door gebruik te maken van conditioneren. De eerste mogelijkheid is dat er nog geen patiënten stonden te wachten. Er moeten dus tenminste twee patiënten binnenkomen, en twee van deze patiënten worden ingepland. Er wordt nu een muntje gegeven aan elke patiënt die in een slot aankomt en niet hoeft te wachten. Aangezien dat precies twee patiënten zijn, is de verwachte beloning twee. De overgangskans is dan als volgt:

$$P(W_e = 0|Y = 0) = \frac{2 \cdot P(A_1 \geq 2)}{E(A_1)} = \frac{2\alpha}{\lambda}(1 - \sum_{k=0}^{1} e^{-\lambda/\alpha}\frac{(\lambda/\alpha)^k}{k!})$$

In het vervolg zullen de kansen op een bepaald aantal aankomsten in de vorm $P(A_m \leq i)$ niet altijd verder uitgeschreven worden.

Als er al een patiënt staat te wachten is er maar één muntje dat nog uitgedeeld kan worden. Er moet tenminste één patiënt binnenkomen, anders kan het muntje niet aan iemand gegeven worden. De overgangskans is dan als volgt:

$$P(W_e = 0|Y = 1) = \frac{1 \cdot P(A_1 \geq 1)}{E(A_1)} = \frac{\alpha}{\lambda}(1 - P(A_1 = 0))$$

Als er al twee patiënten staan te wachten, dan is er geen ruimte meer voor volgende patiënten op de eerstvolgende diagnosedag:

$$P(W_e = 0|Y \geq 2) = 0$$

De fractie van patiënten die niet hoeft te wachten is dan als volgt:

$$\begin{aligned} P(W_e = 0) &= \textstyle\sum_{i=0}^{\infty} P(W_e = 0|Y = i) \cdot P(Y = i) \\ &= \textstyle\sum_{i=0}^{1} P(W_e = 0|Y = i) \cdot P(Y = i) \end{aligned}$$

Voor een gegeven capaciteit s en een aantal wachtende patiënten i is de overgangskans als volgt:

$$\begin{aligned} P(W_e = 0|Y = i) &= \tfrac{E(\text{beloning})}{E(\text{aantal aankomsten})} \\ &= \tfrac{(s-i)\cdot P(A_1 \geq s-i)}{\lambda/\alpha} \\ &= \tfrac{\alpha}{\lambda} \cdot (s - i) \cdot (1 - P(A_1 \leq s - i - 1)) \end{aligned}$$

Dit geeft als fractie van patiënten die niet hoeft te wachten:

$$P(W_e = 0) = \sum_{i=0}^{s-1} \frac{\alpha}{\lambda} \cdot (s - i) \cdot (1 - P(A_1 \leq s - i - 1)) \cdot P(Y = i) \tag{27}$$

Verder invullen geeft:

$$P(W_e = 0) = \sum_{i=0}^{s-1} \left[\frac{\alpha}{\lambda} \cdot (s-i) \cdot \left[1 - \sum_{k=0}^{s-i-1} \left(e^{-\lambda/\alpha} \frac{(\lambda/\alpha)^k}{k!} \right) \right] \cdot P(Y = i) \right] \quad (28)$$

De fractie patiënten die tenminste één periode moet wachten

Het afleiden van deze fractie of kans is verassend eenvoudig. Immers, het is algemeen bekend dat sommeren over de elkaar uitsluitende kansen één moet opleveren.

$$P(W_e = 0) + P(W_e \geq 1) = 1$$

Dit levert de volgende kans op:[3]

$$P(W_e \geq 1) = 1 - [\text{r.h.s. van } (28)] \quad (29)$$

De fractie patiënten die tenminste twee periodes moet wachten

Voor deze fractie zal eerst het geval met capaciteit $s = 2$ zonder wachtenden ($Y = 0$) bekeken worden. Als een patiënt tenminste twee periodes moet wachten, dan kan dat twee oorzaken hebben:

- Er waren teveel patiënten voor de gegeven patiënt.
  Er zijn dus tenminste vier patiënten eerder gearriveerd. Als er vijf patiënten arriveren, dan krijgt er één een muntje, een beloning van één. Als er zes patiënten zijn, dan is de beloning in totaal twee. Als er $k+4$ patiënten aankomen, dan moeten er k patiënten tenminste twee periodes wachten met kans $P(A_1 = k+4)$. De verwachte beloning in dit geval is dus als volgt:

$$\sum_{k=1}^{\infty} k \cdot P(A_{1,n} = k+4)$$

- Er waren niet genoeg patiënten na de gegeven patiënt.
  Er kan in de eerste periode dus maar één patiënt aangekomen zijn, en in de tweede periode kan er niemand meer aankomen. Als er één zo'n patiënt aankomt, krijgt diegene dus een muntje. Als er niemand aankomt in de eerste periode, dan kunnen er geen muntjes uitgedeeld worden. De verwachte beloning is dan

$$1 \cdot P(A_{1,n} = 1) \cdot P(A_{1,n+1} = 0)$$

De totale verwachte beloning voor de patiënten die twee maanden moeten wachten als er niemand in de wachtrij stond is de som van bovenstaande uitdrukkingen. Dit de volgende kans:

$$P(W_e \geq 2 | Y = 0) = \frac{\alpha}{\lambda} \left(\sum_{k=5}^{\infty} [(k-4) \cdot P(A_{1,n} = k)] + P(A_{1,n} = 1) \cdot P(A_{1,n+1} = 0) \right)$$

[3] r.h.s., right hand side, staat voor de rechterkant van de vergelijking.

Stel nu dat er al een persoon wacht. In dat geval valt de tweede mogelijkheid weg. Immers, als er een patiënt arriveert is de capaciteit meteen bereikt. Er kunnen dus alleen teveel patiënten eerder arriveren. Dit geeft de volgende kans:

$$P(W_e \geq 2|Y = 1) = \frac{\alpha}{\lambda} \sum_{k=4}^{\infty} (k-3) \cdot P(A_1 = k)$$

Op vergelijkbare manier kunnen de kansen voor 2 en 3 wachtende patiënten bepaald worden. Vanaf 4 wachtende patiënten is er de volgende kans:

$$P(W_e \geq 2|Y \geq 4) = 1$$

Voor een vaste capaciteit s zijn de volgende overgangskansen op te stellen:

$$P(W_e \geq 2|Y = i) \quad = \quad \begin{cases} \frac{\alpha}{\lambda} \sum_{k=1}^{s-1-i} [k \cdot P(A_1 = k) \cdot P(A_1 \leq s-k-1-i)] & \\ \quad + \frac{\alpha}{\lambda} \sum_{k=2s+1}^{\infty} [(k-2s) \cdot P(A_1 = k-i)] & \textit{voor } i \leq s-2 \\ \frac{\alpha}{\lambda} \sum_{k=2s+1}^{\infty} [(k-2s) \cdot P(A_1 = k-i)] & \textit{voor } s-1 \leq i < 2s \\ 1 & \textit{voor } i \geq 2s \end{cases}$$

Hieruit valt de gevraagde kans af te leiden:

$$P(W_e \geq 2) = \sum_{i=0}^{\infty} P(W_e \geq 2|Y = i) \cdot P(Y = i)$$

Met behulp van de tot nu toe afgeleide kansen is de kans op één periode wachten te bepalen:

$$P(W_e = 1) = P(W_e \geq 1) - P(W_e \geq 2)$$

De fractie patiënten die tenminste drie periodes moet wachten

De berekening van deze fractie heeft veel overeenkomsten met de berekening van de fractie patiënten die tenminste twee periodes moet wachten. Er zijn wederom twee gevallen te onderscheiden:

- Er waren teveel patiënten voor de gegeven patiënt.
  Stel dat $s = 2$. Als $Y = 0$, dan zijn er dus tenminste zes patiënten voor de gegeven patiënt gearriveerd. De verwachte beloning is dan als volgt:

  $$\sum_{k=1}^{\infty} k \cdot P(A_1 = k+6)$$

  Voor $Y = i$, met $i < 6$, geldt het volgende:

  $$\sum_{k=1}^{\infty} k \cdot P(A_1 = k-i+6)$$

Voor een capaciteit s is de verwachte beloning dan als volgt:

$$\sum_{k=3s+1}^{\infty} [(k-3s) \cdot P(A_1 = k-i)]$$

Merk hierbij op dat deze uitdrukking bijna gelijk is aan die voor tenminste twee periodes wachttijd. Het enige verschil is dat $2s$ vervangen is door $3s$.

- Er waren niet genoeg patiënten na de gegeven patiënt.
  Stel dat $s = 2$. Als $Y = 0$, dan komt er in de eerste periode precies één patiënt aan en in de tweede en derde periode niemand. De kans dat er in de tweede en derde periode in totaal l patiënten aankomen is als volgt:

  $$P(A_{2,n+1} = l) = \frac{(2 \cdot \lambda/\alpha)^l}{l!} \cdot e^{-2\lambda/\alpha}$$

  De verwachte beloning is dan als volgt:

  $$P(A_{1,n} = 1) \cdot P(A_{2,n+1} = 0)$$

  Voor vaste capaciteit s geeft dit de volgende uitdrukking:

  $$\sum_{k=1}^{s-1-i} [k \cdot P(A_{1,n} = k) \cdot P(A_{2,n+1} \leq s-k-1-i)]$$

  Merk hierbij op dat alleen de tweede kans hierbij veranderd is ten opzichte van de uitdrukking voor tenminste twee periodes wachttijd. Die kans loopt nu over twee periodes in plaats van over één periode.

Samenvattend geeft dit de volgende overgangskansen:

$$P(W_e \geq 3|Y=i) \quad = \begin{cases} \frac{\alpha}{\lambda}\sum_{k=1}^{s-1-i}[k \cdot P(A_{1,n}=k) \cdot P(A_{2,n+1} \leq s-k-1-i)] & \\ \quad + \frac{\alpha}{\lambda}\sum_{k=3s+1}^{\infty}[(k-3s) \cdot P(A_{1,n}=k-i)] & \textit{voor } i \leq s-2 \\ \frac{\alpha}{\lambda}\sum_{k=3s+1}^{\infty}[(k-3s) \cdot P(A_{1,n}=k-i)] & \textit{voor } s-1 \leq i < 3s \\ 1 & \textit{voor } i \geq 3s \end{cases}$$

De gevraagde fractie is dan als volgt:

$$P(W_e \geq 3) = \sum_{i=0}^{\infty} P(W_e \geq 3|Y=i) \cdot P(Y=i)$$

De fractie patiënten die langer dan m periodes moet wachten

Nu de structuur bekend is, kunnen de overgangskansen voor tenminste m periodes bepaald worden. Deze zijn als volgt voor $m \geq 2$:

$$P(W_e \geq m|Y=i) \quad = \begin{cases} \frac{\alpha}{\lambda}\sum_{k=1}^{s-1-i}[k \cdot P(A_1=k) \cdot P(A_{m-1} \leq s-k-1-i)] & \\ \quad + \frac{\alpha}{\lambda}\sum_{k=m \cdot s+1}^{\infty}[(k-m \cdot s) \cdot P(A_1=k-i)] & \textit{voor } i \leq s-2 \\ \frac{\alpha}{\lambda}\sum_{k=m \cdot s+1}^{\infty}[(k-m \cdot s) \cdot P(A_1=k-i)] & \textit{voor } s-1 \leq i < m \cdot s \\ 1 & \textit{voor } i \geq m \cdot s \end{cases}$$

De gevraagde fractie is dan als volgt:

$$P(W_e \geq m) = \sum_{i=0}^{\infty} P(W_e \geq m | Y = i) \cdot P(Y = i)$$

De wachttijd voor exact m periodes is nu als volgt te bepalen:

$$P(W_e = m) = P(W_e \geq m) - P(W_e \geq m + 1)$$

4 Resultaten

4.1 Planningsmodel

Het AMC wil graag een planningsmodel hebben waarmee roosters voor behandelaars en patiënten gemaakt kunnen worden. Deze roosters voldoen zo veel mogelijk aan de wensen van zowel het ziekenhuis en als die van de patiënten.

Om roosters te kunnen genereren is er gebruik gemaakt van gegevens van het AMC. Vanuit het AMC is er een lijst fictieve patiënten met bijbehorende behandelingen opgesteld, gebaseerd op huidige patiënten met een neuromusculaire aandoening die in het AMC behandeld worden. Met behulp van deze lijst zijn er simulaties gedraaid om roosters te maken. In deze simulaties is geprobeerd verschillende combinaties van patiënten in te plannen.

4.1.1 Oplosbaarheid

Omdat je zoveel mogelijk de noodzakelijke afspraken voor een patiënt op één dag wil plannen, is het model om te beginnen ontwikkeld met het idee dat alle noodzakelijke afspraken in elk geval op één dag moeten. Dit model werkte naar behoren. Maar zodra als input de benodigde afspraken van een echte patiënt met een neuromusculaire aandoening werd genomen, werden er geen afspraken meer gepland. De vraag rees wat hier de oorzaak van was. Er bleek dat veel van de patiënten met een neuromusculaire aandoening op een dag meer tijd nodig hebben aan noodzakelijke afspraken dan dat er tijd is. Met de eis dat alle noodzakelijke afspraken op één dag gepland moeten worden is het planningsmodel dus onoplosbaar. Er is toen gekeken naar een verdeling van de noodzakelijke afspraken over meerdere dagen. Dit is uiteindelijk verwerkt door middel van onder andere voorwaarde 9, (16).

4.1.2 Kalibratie doelfunctieconstantes

Om een goede planning te krijgen is aan het AMC gevraagd aan te geven hoe belangrijk wat hen betreft bepaalde factoren zijn en hoe de verhoudingen tussen deze factoren liggen. In tabel 9 staat de weging zoals aangegeven door het AMC.

Tabel 9: Wegingsfactoren volgens AMC

factor	weging	referentie
aantal patiënten dat al zijn afspraken op één dag heeft	10	doel 1
de hoeveelheid ingeplande afspraaktijd	10	doel 2
de tijd die een patiënt tussendoor moet wachten als deze in het ziekenhuis is	5	doel 3
de tijd die arts uit het basisteam tussendoor moet wachten	6	doel 4
de tijd die een consultarts tussendoor moet wachten	6	doel 4
het aantal verplaatsingen van de patiënt[a]	1	-
het aantal afspraken waarvoor een arts uit het basisteam naar het centrum komt	2	voorwaarde 7
het aantal afspraken waarvoor een consultarts naar het centrum komt	2	voorwaarde 7

[a] uiteindelijk is er in dit onderzoek geen rekening gehouden met het aantal verplaatsingen van een patiënt. De weging is hier wel genoemd zodat daar bij eventueel vervolgonderzoek gebruik van gemaakt kan worden.

De wegingsfactoren voor de artsen uit het basisteam en de consultartsen zijn gelijk met betrekking tot de wachttijd tussen de verschillende afspraken, daarom kunnen deze wegingen samengevoegd worden in de doelfunctieconstante ϵ als de waarden van die artsen in de vector w maar gelijk zijn.

De laatste twee waarden zijn niet van belang voor de doelfunctie maar zijn verderop in dit hoofdstuk wel nodig, vandaar dat ze hier toch genoemd worden.

Het is niet zo dat de wegingen uit tabel 9 zomaar ingevoerd kunnen worden in het programma. Het is namelijk zo dat de verschillende doelfuncties niet allemaal resultaten in dezelfde orde van grootte hebben. Zo geeft de doelfunctie over het aantal gewogen patiënten een resultaat van veel kleinere orde dan de doelfunctie over de behandeltijd. Na een aantal simulaties zijn de waarden voor de doelfunctie bepaald, zie tabel 10

Tabel 10: doelfunctieconstantes

constante	doelfunctie	waarde
κ	1	100
θ	2	2
γ	3	50
ϵ	4	6
δ	5	10

Deze waarden zijn bepaald met behulp van uitkomsten van een aantal simulaties. Daarin werd gezien dat de orde van de hoeveelheid ingeplande afspraaktijd ongeveer vijftig keer zo groot was als het aantal volledig ingeplande patiënten. Ook is de tijd die artsen moeten wachten van een tien keer zo grote orde als het aantal volledig ingeplande patiënten. Omdat er geen weging bekend is voor de extra patiënten, maar het AMC aangaf extra patiënten veel minder belangrijk te vinden dan volledig ingeplande patiënten, is er voor gekozen deze weging tien keer lager te stellen dan die van het aantal volledig ingeplande patiënten. Omdat de orde van het gewogen aantal volledig ingeplande patiënten en het gewogen aantal extra patiënten ongeveer gelijk zal zijn, is de uiteindelijke doelfunctieconstante voor het gewogen aantal extra patiënten ook tien keer zo klein als de doelfunctieconstante voor het gewogen aantal volledig ingeplande patiënten.

Wat bij het simuleren opvalt is dat het model erg gevoelig is voor de waarden van de doelfunctieconstantes. De uitkomsten van de simulaties veranderen namelijk aanzienlijk als de gekalibreerde waarden ingevuld worden ten opzichte van de wegingen die het AMC gegeven heeft. Dit is vermoedelijk omdat de hoeveelheid geplande afspraaktijd veel zwaarder woog omdat deze van een grotere orde is. Ook voor kleine veranderingen in de doelfunctieconstantes is het model gevoelig. Het is dus van belang deze constantes goed te schalen.

4.1.3 Roosters

Als er gesimuleerd wordt met de verschillende randvoorwaarden en inputgegevens die vanuit het AMC gegeven zijn worden er roosters gegenereerd voor de verschillende patiënten en behandelaars. Bij het genereren van deze roosters is de dag opgedeeld in een aantal tijdsloten, die bij deze resultaten altijd gelijk zullen zijn aan een kwartier. Het programma geeft zelf output zoals gegeven staat in figuur 3,4 en 5 op de pagina hierna. In die output staan bij de roosters van de patiënten eerst de begintijdsloten, vervolgens de behandelingen. Daarna staat aangegeven of een afspraak gepland is. In de laatste kolom staat aangegeven hoelang een bepaalde behandeling moet duren, gegeven in aantal tijdsloten. In het rooster van de neuroloog staat eerst het begintijdslot van een afspraak. Vervolgens de patiënt die komt, dan welke behandeling er voor deze patiënt gepland staat en in de laatste kolom staat aangegeven of de afspraak ingepland is.

Deze roosters zijn vervolgens in tabel 11, 12 en 13 gebruiksvriendelijker weergegeven.

Figuur 3: rooster patiënt diagnosedag

i	p	xijp_Afspraak_Patient
11	zorgcoördinator	1
12	klinisch geneticus	1
15	neuroloog	1
18	klinische foto	1
19	bloedafname	1
20	EMG	1
24	röntgen	1
26	terugkoppeling neuroloog	1
27	nagesprek zorgcoördinator	1

p	L_Lengte_Afspraken
neuroloog	3.00
klinisch geneticus	3.00
zorgcoördinator	1.00
bloedafname	1.00
EMG	4.00
klinische foto	1.00
röntgen	2.00
terugkoppeling neuroloog	1.00
nagesprek zorgcoördinator	1.00

Figuur 4: rooster patiënt follow-updag

i	p	xijp_Afspraak_Patient
14	zorgcoördinator	1
15	neuroloog	1
15	kinderarts	1
17	revalidatie arts	1
18	orthopeed	1
22	nagesprek zorgcoördinator	1
23	terugkoppeling revalidatie arts	1

p	L_Lengte_Afspraken
neuroloog	2.00
zorgcoördinator	1.00
kinderarts	2.00
revalidatie arts	2.00
nagesprek zorgcoördinator	1.00
orthopeed	1.00
terugkoppeling revalidatie arts	1.00

Figuur 5: rooster neuroloog

i	j	p	zijkp_Afspraak_Behandelaar
15	3	neuroloog	1
18	5	neuroloog	1
26	3	terugkoppeling neuroloog	1
28	5	terugkoppeling neuroloog	1

Tabel 11: Rooster patiënt diagnosedag

tijd	behandeling
10.30u-10.45u	afspraak met zorgcoördinator
10.45u-11.30u	consult bij klinisch geneticus
11.30u-12.15u	consult bij neuroloog
12.15u-12.30u	klinische foto
12.30u-12.45u	bloedafname
12.45u-13.45u	EMG
13.45u-14.15u	röntgenfoto
14.15u-14.30u	terugkoppelingsgesprek neuroloog
14.30u-14.45u	terugkoppelingsgesprek zorgcoördinator

In het rooster voor deze patiënt op een diagnosedag, tabel 11, is te zien dat de afspraken erg strak op elkaar gepland is, er zijn immers geen gaten in zijn rooster. Wellicht rijst de vraag wanneer het MDO (multi-disciplinair overleg) kan plaatsvinden als het rooster van de patiënt zo volgepland is, maar dit overleg kan bijvoorbeeld in de tijdsloten 24 en 25 plaatsvinden. De bloeduitslagen zijn dan binnen en bij het röntgenonderzoek hoeven geen artsen aanwezig te zijn die ook op het MDO verwacht worden. Het plannen van een lunch wordt voor deze patiënt ook lastig gezien er geen gaten in het rooster zitten. Dat komt omdat bij het maken van dit rooster er geen rekening gehouden is met een lunch. Er kan echter zonder veel problemen wel rekening gehouden worden met de lunch, zoals in het rooster patiënt follow-up dag te zien is, tabel 12. Het AMC kan een keuze maken in de lengte en het tijdstip van de lunch en dit vervolgens verwerken.

Tabel 12: rooster patiënt follow-up dag

tijd	behandeling
11.15u-11.30u	afspraak met zorgcoördinator
11.30u-12.00u	consult bij neuroloog
11.30u-12.00u	consult bij kinderarts
12.00u-12.30u	consult bij revalidatie-arts
12.15u-12.30u	consult bij orthopeed
12.30u-13.15u	lunchpauze
13.15u-13.30u	terugkoppelingsgesprek met zorgcoördinator
13.30u-13.45u	terugkoppelingsgesprek met revalidatie-arts

Wat opvalt in het rooster van deze patiënt op een follow-up dag, tabel 12, is dat er een aantal afspraken gelijk zijn. Dit zijn de zogenaamde carrousel-consulten. Het AMC heeft aangegeven dat de consulten bij de neuroloog en de kinderarts voor deze patiënt tegelijk mogen plaatsvinden. Er is te zien dat deze patiënt geen onderzoeken nodig heeft maar alleen consulten, daarom kan het eerste MDO in dit geval plaatsvinden voor 11.15u. Het tweede overleg kan plaatsvinden in de lunchpauze van de patiënt, dus tussen 12.30u en 13.15u.

Tabel 13: rooster neuroloog

tijd	patiënt	behandeling
11.30u-12.15u	3	consult bij neuroloog
12.15u-13.00u	5	consult bij neuroloog
14.15u-14.30u	3	terugkoppelingsgesprek met neuroloog
14.45u-15.00u	5	terugkoppelingsgesprek met neuroloog

In tabel 13 is het rooster van de neuroloog voor een bepaalde diagnosedag weergegeven. Er komen die dag twee patiënten, patiënt drie en patiënt vijf. Patiënten worden hier aangegeven met nummers omdat er met vertrouwelijke informatie gewerkt wordt, maar in de input kan zonder problemen het nummer in een naam veranderd worden.

4.1.4 Aantal ingeplande patiënten

Het AMC heeft aangegeven in de beginfase twee patiënten per dag op het centrum te willen ontvangen en dit later wellicht uit te willen breiden. Het is dus voor het AMC, maar ook voor de toegangstijdberekeningen, van belang dat bekend is hoeveel patiënten er met welke kans ingepland kunnen worden. Dit is bepaald door middel van simulatie. Doordat deze simulaties erg veel tijd kosten kon er slechts een beperkt aantal uitgevoerd worden. Er is telkens geprobeerd vijf willekeurige patiënten in te plannen. Er is voor gekozen steeds vijf nieuwe patiënten te nemen omdat op die manier veel verschillende gevallen onderzocht kunnen worden. Zo zijn er van iedere neuromusculaire aandoening patiënten bekeken en zijn zoveel mogelijk combinaties van patiënten met verschillende aandoeningen doorgerekend. Een andere mogelijkheid is om de patiënten die in een simulatie niet zijn ingepland, bij de volgende simulatie
alsnog proberen in te plannen. Wegens tijdgebrek is deze optie, net als enkele andere, niet meegenomen. De gevonden kansen, zie tabel 14, zijn daarom niet heel nauwkeurig, maar geven wel een indicatie.

Tabel 14: kans op bepaald aantal ingeplande patiënten

# ingeplande patiënten	kans bij diagnosedag
0	0.1
1	0
2	0.45
3	0.45
4 of meer	0

De kans op nul ingeplande patiënten is wellicht verrassend, maar dit heeft te maken met de combinatie van patiënten. Deze combinatie kan er soms voor zorgen dat er niet aan de eisen, voornamelijk de voorwaarde dat een arts minimaal twee behandelingen uitvoert per diagnosedag, voldaan wordt. Maar er worden ook nul patiënten ingepland als er maar één iemand in de wachtrij staat. De kans op één ingeplande patiënt is gelijk aan nul, omdat er geen patiënten zijn die geen consultafspraken hebben of bij alle artsen waar ze moeten komen minstens twee behandelingen hebben, zie tabel 9. Vanuit het AMC is ook aangegeven dat één patiënt simpelweg te weinig is om een hele dag voor te organiseren. Gelukkig komt het niet vaak voor dat er niemand ingepland wordt. De kans op twee en drie ingeplande patiënten is gelijk, de andere kansen zijn nul. Afhankelijk van de combinatie van patiënten is het mogelijk twee of drie patiënten in te plannen.

Wegens een tekort aan tijd zijn alleen de kansen aangaande de diagnosedagen berekend. De kansen aangaande follow-updagen kunnen doormiddel van een groot aantal simulaties alsnog vastgesteld worden.

4.1.5 Invloed input

Bij simulaties met de gegevens zoals ze door het AMC zijn aangeleverd bleek dat het maken van een rooster soms erg lastig was. In deze paragraaf wordt er gekeken of er andere resultaten zijn als de verschillende inputgegevens aangepast worden. Door de inputgegevens te veranderen zullen sommige randvoorwaarden minder beperkend worden, waardoor er meer oplossingen mogelijk zijn. Er zal altijd een vergelijking gemaakt worden met de beginsituatie waarin de gekalibreerde doelfunctieconstantes gebruikt worden en de input en randvoorwaarden zoals aangegeven door het AMC. Er zullen dus niet meerdere afwijkingen in één keer bekeken worden.

Minimum aantal afspraken behandelaars

Het AMC heeft aangegeven dat artsen, zowel uit het basisteam als degenen op consultbasis, minstens twee behandelingen moeten uitvoeren als zij naar het NMA centrum komen. Dit staat ook vermeld in tabel 9. Om te kijken wat de invloed hiervan is, is het minimum aantal behandelingen teruggeschroefd naar één, wat eigenlijk inhoudt dat het niet uit maakt hoeveel behandelingen een arts uitvoert. Dit heeft alleen invloed op het aantal consulten, niet op het aantal onderzoeken, omdat er voor onderzoeken al geen beperking was. Als deze verandering gesimuleerd wordt valt op dat de waarde van de totale doelfunctie heel erg stijgt, wat betekend dat de planning sterk verbetert. Dit is vooral doordat er meer patiënten worden ingepland, regelmatig kunnen er namelijk door deze verandering vier patiënten worden ingepland. Dit kwam eerder niet voor.

De verhoging van de waarde van de doelfunctie zit dan vooral in het hoger worden van van doel 1 (1) en doel 2 (2). Maar er zitten ook minder gaten in het rooster van de patiënt, wat doel 3 (3) is. Blijkbaar kan er een efficiënter rooster gemaakt worden als er meer patiënten ingeroosterd worden. Er is door deze verandering ook te zien dat er meer combinaties van patiënten mogelijk zijn. Zo werden twee patiënten met consulten bij verschillende artsen eerder niet ingepland, maar zal dat nu in veel gevallen wel gebeuren.

De invloed van de hierboven besproken verandering kan in cijfers gevat worden, zie tabel 15.

Vervolgens is het minimum aantal afspraken van de artsen weer teruggezet naar twee en is ook het minimum aantal afspraken voor een onderzoek op twee gezet. Deze aanpassing lijkt geen invloed te hebben op zowel de doelfunctiewaarde als het aantal ingeplande patiënten, dit in tegenstelling tot het verlagen van die waarde. De verwachting is dat deze verandering voor bepaalde combinaties van patiënten wel uit maakt. Sommige combinaties van patiënten kunnen immers niet meer gepland worden.

Tabel 15: invloed minimum aantal afspraken behandelaars

	standaardgeval	geen minimum
aantal ingeplande patiënten	2	3
wachttijd patiënt	30 minuten	0
gemiddelde wachttijd patiënt	15 minuten	0
wachttijd artsen	5 uur en 15 minuten	6 uur en 45 minuten
aantal aanwezige artsen	6	9
gemiddelde wachttijd artsen	52.5 minuten	45 minuten

Wachten op uitslag bloedonderzoek

Het AMC heeft aangegeven dat tijdens het MDO, multidisciplinair overleg, de uitslagen van het bloedonderzoek binnen moeten zijn. De uitslagen van een bloedonderzoek zijn na een uur beschikbaar. Alle afspraken die na het MDO ingepland moeten worden moeten dus ook wachten op deze uitslagen. Het duurt een uur voor de uitslagen van het bloedonderzoek bekend zijn en vervolgens moet het MDO ook nog plaatsvinden voor de rest van de afspraken kunnen beginnen. Er komen dus hoge waarden in T2 te staan, de inputtabel die volgorderelaties aangeeft. Om te kijken wat het effect is van het wachten op de uitslagen van het bloedonderzoek zijn alle waarden in $T2$, die hiermee te maken hebben, op nul gezet. Het gevolg van deze aanpassing is dat de waarde van de doelfunctie stijgt en dat er meer patiënten ingepland worden. De verhoging van de waarde van de doelfunctie komt door een verhoging van de waarde van doel 1 (1) en doel 2 (2).

De invloed van de hierboven besproken verandering kan in cijfers gevat worden, zie tabel 16. Het standaardgeval in deze tabel is anders omdat deze verandering bekeken is voor follow-up patiënten terwijl de verandering van het minimum aantal afspraken bekeken is voor diagnosepatiënten.

Tabel 16: invloed wachten op uitslag bloedonderzoek

	standaardgeval	geen minimum
aantal ingeplande patiënten	2	4
wachttijd patiënt	0	0
gemiddelde wachttijd patiënt	0	0
wachttijd artsen	2 uur en 30 minuten	5 uur en 15 minuten
aantal aanwezige artsen	6	8
gemiddelde wachttijd artsen	25 minuten	39.4 minuten

Maximum behandeltijd patiënten

In het planningsmodel wordt gebruikt gemaakt van het aantal tijdsloten dat een patiënt op een dag aan behandelingen aan kan. Omdat hierover geen informatie beschikbaar is op dit moment, is er in het standaardgeval vanuit gegaan dat daar geen beperkingen op liggen. Het is echter goed denkbaar dat patiënten niet hele dagen behandelingen aankunnen. Er is dus een simulatie gedaan waarbij het aantal tijdsloten dat een patiënt behandeld mag worden beperkt is, dit is gedaan door de waarden in de vector a te verlagen. Uit deze simulaties bleek dat het verlagen van deze waarden alleen invloed heeft als de totale benodigde behandeltijd van de patiënt meer is dan behandeltijd die de patiënt aankan. Mocht dit laatste het geval zijn, dan zullen er minder of andere patiënten ingepland worden. Anders zal wel dezelfde combinatie van patiënten ingepland worden, maar moet de genoemde patiënt nog een keer terugkomen voor de rest van de afspraken.

4.2 Resultaten stochastiek

Het AMC wil graag weten wat de toegangstijd van een patiënt is voor een diagnosedag. Binnen het AMC is er de richtlijn dat de toegangstijd van een patiënt maximaal twee maanden is. Daarom is het erg interessant of en hoe binnen die grens gebleven kan worden.

De toegangstijd is onderverdeeld in drie delen: W_b, W_e en W_d, zie figuur 2. In dit figuur vallen de beslismomenten samen met de diagnosedagen. W_b is de tijd tussen het ontvangen van de vragenlijst van een patiënt en het eerstvolgende beslismoment. W_e is de tijd tussen het eerste beslismoment sinds het terugsturen van de vragenlijst en het beslismoment waarop de patiënt wordt geaccepteerd. W_d is de tijd tussen het moment dat besloten wordt de patiënt in te plannen en de daadwerkelijke diagnosedag, hiervoor wordt een maand genomen in de berekeningen. Opgeteld leveren deze drie tijden de toegangstijd voor een patiënt. De tijden W_b en W_e hangen samen doordat er bij de berekening van W_e gebruik is gemaakt van het "first come, first serve" principe. Als een patiënt eerder is aangekomen dan een andere patiënt zal daarmee rekening moeten worden gehouden. Hierdoor zullen de waarden van W_e voor de verschillende patiënten een verschillende verdeling hebben. Er is in deze resultaten beperkt rekening gehouden met deze correlatie tussen W_e en W_b, omdat het verband niet onderzocht is.

4.2.1 Wachttijden patiënten

Met behulp van de formules, zoals ze in paragraaf 3.4.2 beschreven zijn, worden verschillende situaties bekeken. Het AMC heeft aangegeven elke maand een diagnosedag te willen organiseren ($\alpha = 12$) waarop precies twee patiënten behandeld worden ($s = 2$). Er worden in eerste instantie ongeveer twintig patiënten per jaar verwacht ($\lambda = 20$). Men verwacht dat dit aantal in de loop der jaren nog zal stijgen. De invloed van de tijd tussen het ontvangen van de vragenlijst in het AMC en het eerste beslismoment (W_b) op de totale wachttijd is niet onderzocht. Deze wachttijd zal in de gegeven situatie maximaal een maand zijn. De tijd tussen het geaccepteerd worden voor een diagnosedag en het daadwerkelijk arriveren bij het AMC (W_d) wordt op één maand gesteld. Het aantal periodes dat een patiënt moet wachten doordat er teveel of juist niet genoeg andere patiënten zijn (W_e) wordt omgerekend naar maanden.

Ten eerste zijn de wachttijden voor de gegeven situatie doorgerekend. In tabel 17 staat welke fractie van de patiënten een bepaalde wachttijd heeft. De ondergrens van de genoemde tijden is de wachttijd gerekend vanaf het eerste beslismoment. De bovengrens is de maximale wachttijd. Voor het berekenen van de gemiddelde wachttijd is de wachttijd tot het eerste beslismoment op twee weken gesteld.

Tabel 17: Wachttijden bij 12 diagnosedagen per jaar, 2 patiënten per diagnosedag en gemiddeld 20 patiënten per jaar

Wachttijd, w, in maanden	Percentage
$1 < w \leq 2$	27.6%
$2 < w \leq 3$	36.5%
$3 < w \leq 4$	18.4%
$4 < w \leq 5$	8.9%
$5 < w \leq 6$	4.4%
$6 < w$	4.2%

Gemiddelde wachttijd 2.9 maanden.

Hier valt meteen op dat de wachttijden erg kunnen oplopen; ruim 4% van alle patiënten moet minstens een half jaar wachten. De doelstelling van het AMC is dat een patiënt binnen twee maanden na het terugsturen van de vragenlijst op een diagnosedag zou moeten komen. Deze doelstelling zal op deze manier niet gehaald worden. Door verschillende resultaten te genereren zal worden onderzocht wat de invloed van verschillende parameters is.
Stel dat er bijvoorbeeld drie patiënten per dag behandeld zouden kunnen worden, dan zou dat de wachttijden opleveren zoals beschreven in tabel 18.

Tabel 18: Wachttijden bij 12 diagnosedagen per jaar, 3 patiënten per diagosedag en gemiddeld 20 patiënten per jaar

Wachttijd, w, in maanden	Percentage
$1 < w \leq 2$	47.1%
$2 < w \leq 3$	45.1%
$3 < w \leq 4$	6.3%
$4 < w \leq 5$	1.1%
$5 < w \leq 6$	0.3%
$6 < w$	0.1%

Gemiddelde wachttijd 2.1 maanden.

Deze wachttijden zijn aanzienlijk beter dan wanneer er twee patiënten per dag behandeld worden. Een andere mogelijkheid is om te variëren met het aantal patiënten per jaar. In tabel 19 staan een aantal verschillende gemiddelde aankomsten per jaar.

Tabel 19: Wachttijden bij 12 diagnosedagen per jaar, 2 patiënten per diagnosedag en verschillende aantallen patiënten per jaar

(a)

Wachtijd in maanden	$\lambda = 10$	$\lambda = 15$	$\lambda = 18$	$\lambda = 20$	$\lambda = 22$
$1 < w \leq 2$	56.0%	47.3%	37.0%	27.6%	15.7%
$2 < w \leq 3$	33.6%	41.0%	41.1%	36.5%	25.1%
$3 < w \leq 4$	6.5%	9.2%	14.7%	18.4%	18.0%
$4 < w \leq 5$	2.2%	1.9%	4.8%	8.9%	12.6%
$5 < w \leq 6$	0.9%	0.4%	1.6%	4.3%	8.9%
$6 < w$	0.7%	0.1%	0.8%	4.2%	19.6%

(b)

	$\lambda = 10$	$\lambda = 15$	$\lambda = 18$	$\lambda = 20$	$\lambda = 22$
Gemiddelde wachttijd in maanden	2.1	2.2	2.4	2.9	3.8

Bij $\lambda \geq 24$ zullen de wachttijden exploderen. Er komen dan immers meer patiënten aan dan dat er behandeld kunnen worden. De gemiddelde wachttijden bij verschillende capaciteiten zijn samengevat in figuur 6. Uit de figuur valt af te leiden dat als er meer patiënten per jaar binnenkomen, het verstandig is om meer patiënten op een dag te behandelen. De gemiddelde wachttijden blijven dan rond de negen weken.

4.2.2 Aantal diagnosedagen

Op dit moment heeft het AMC aangegeven twaalf mogelijke diagnosedagen per jaar, $\alpha = 12$, te willen plannen. De vraag is wat de invloed van het veranderen van deze parameter op de wachttijden is. Als $\alpha = 24$ genomen wordt, dus iedere halve maand een mogelijkheid tot een diagnosedag, zijn de wachttijden als volgt:

Tabel 20: Wachttijden bij twintig patiënten per jaar, twee patiënten per dag, verschillend aantal dagen per jaar

(a)

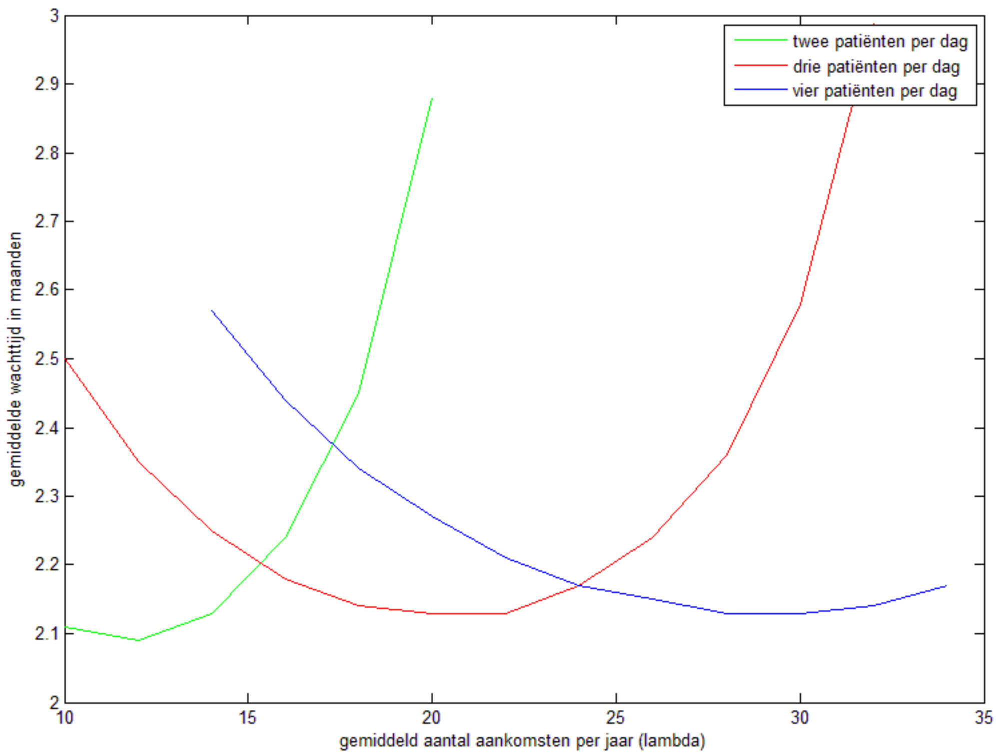
Wachttijd w in maanden	$\alpha = 12$	$\alpha = 24$
$1 < w \leq 2$	27.6%	89.6%
$2 < w \leq 3$	36.5%	8.7%
$3 < w$	35.9%	1.6%

(b)

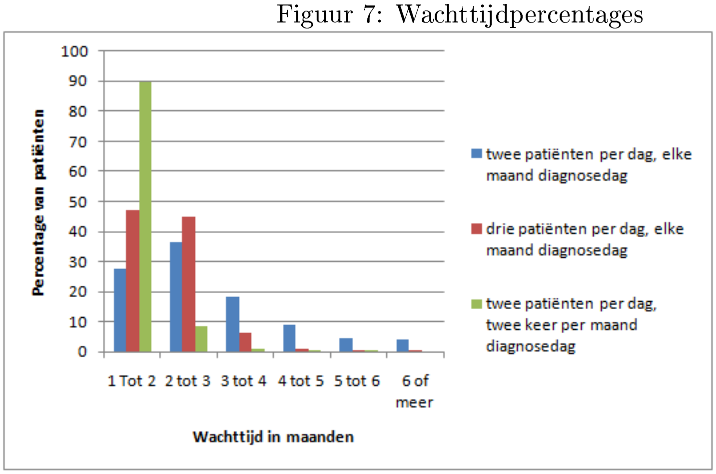
	$\alpha = 12$	$\alpha = 24$
Gemiddelde wachttijd in maanden	2.9	1.5

In tabel 20 is te lezen dat de wachttijden heel erg veranderen als er dubbel zo veel diagnosedagen per jaar mogelijk zijn. Bijna 90% van de patiënten kan dan binnen twee maanden na het ontvangen van de vragenlijst behandeld worden. De gemiddelde wachttijd wordt ook gehalveerd. Merk op dat alleen het aantal

Figuur 6: Gemiddelde wachttijd bij 12 diagnosedagen per jaar



Figuur 7: Wachttijdpercentages



mogelijkheden voor diagnosedagen omhoog gaat. Er zullen bij gemiddeld 20 patiënten per jaar gemiddeld tien diagnosedagen zijn. Er worden immers precies twee patiënten per diagnosedag behandeld. Door de diagnosedagen flexibeler te plannen, bijvoorbeeld halverwege en aan het eind van de maand, in plaats van alleen aan het eind van de maand, zullen de wachttijden aanzienlijk minder worden. De verschillende wachttijdpercentages zijn samengevat in figuur 7.

Uit simulaties blijkt dat het niet heel veel uit maakt hoeveel patiënten er per jaar komen om deze wachttijden laag te houden. Als er twee keer per maand een mogelijkheid tot een diagnosedag is, en er komen vijftien tot dertig patiënten per jaar, dan wordt 85% van de patiënten binnen twee maanden geholpen en is de gemiddelde wachttijd zeven weken.

4.3 Planningsmodel en toegangstijdenmodel

In deze paragraaf worden de resultaten besproken die samenhangen met zowel het planningsmodel als het toegangstijdenmodel. Ook wordt er besproken wat de invloed van het ene model op het andere is.

In het toegangstijdmodel wordt van het "first come, first serve" principe uitgegaan. In het planningsmodel wordt echter geprobeerd een groep patiënten in te plannen en dit model houdt zich niet altijd aan het "first come, first serve" principe. Stel er zou een groep van acht patiënten in de wachtrij staan dan zou het planningsmodel bijvoorbeeld kunnen bepalen om alleen patiënt twee en patiënt acht in te plannen, hoewel patiënt één al langer stond te wachten. Er wordt echter bij het toegangstijdenmodel vanuit gegaan dat patiënt één en twee ingepland worden.

Een doelstelling van het AMC is om 80% van de patiënten op één dag te helpen. Deze doelstelling is op verschillende manieren te interpeteren. Hier is er vanuit gegaan dat het de bedoeling is dat 80% van de patiënten die gezien wordt op al zijn afspraken op één dag heeft. Een andere doelstelling is om patiënten die naar een diagnosedag komen een toegangstijd van maximaal twee maanden te laten hebben. Deze doelstellinge zijn echter niet zomaar te verenigen. Er zullen dus afwegingen gemaakt moeten worden. Hiervoor zijn drie mogelijke alternatieven gegeven:

- Het ziekenhuis probeert met behulp van het planningsmodel elke diagnosedag een beperkt aantal patiënten in te plannen. Op deze manier kunnen veel patiënten al hun afspraken op één dag afronden. Deze maatregel heeft echter tot gevolg dat de toegangstijd van een diagnosedag erg groot kan worden. Deze toegangstijd wordt naarmate het NMA centrum gaat groeien qua aantal patiënten steeds groter, maar ook met het huidige patiënten aantal en capaciteit zal de toegangstijd niet binnen de norm van 2 maanden blijven.

- Het ziekenhuis kiest ervoor om de toegangstijd van een diagnosedag laag te houden. Dan zal of de capaciteit van een diagnosedag omhoog moeten of moet het aantal mogelijke diagnosedagen vergroot worden. Hierdoor kan tenminste 85% van de patiënten binnen twee behandeld worden en is de wachttijd gemiddeld zeven weken.

- Het ziekenhuis kiest ervoor sommige voorwaarden te versoepelen. Bijvoorbeeld dat een arts minimaal twee behandelingen per diagnosedag moet hebben of dat een multidisciplinair overleg moet wachten totdat de uitslagen van de bloedonderzoeken terug zijn. Dit kan de capaciteit van een diagnosedag verhogen en wordt de kans dat een patiënt ingepland kan worden. Dit zal ook een positief effect op de toegangstijden hebben.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

Voor dit onderzoek zijn de volgende twee onderzoeksdoelen opgesteld:

Planningsmodel *Er wordt een wiskundig model gemaakt waarmee dagplanningen moeten worden gerealiseerd. Dagplanningen moeten zodanig zijn dat voldaan wordt aan alle eisen, en zoveel mogelijk wensen, van de patiënten en behandelaars. Door middel van simulaties worden uitspraken gedaan over de mogelijke roosters en de capaciteit van een NMA centrum. Tenslotte wordt geanalyseerd hoe dit verbeterd zou kunnen worden.*

Toegangstijdmodel *Omdat de aankomstmomenten van patiënten onzeker zijn, worden de toegangstijden van patiënten voor een diagnosedag met behulp van een wiskundig model onderzocht. Er worden voor verschillende situaties kansverdelingen voor de toegangstijden berekend om vervolgens aanbevelingen te geven hoe toegangstijd van patiënten acceptabel kan blijven. Tenslotte zal het effect van het planningsmodel op de toegangstijden geanalyseerd worden.*

Met het gemaakte planningsmodel kunnen roosters gegenereerd worden voor zowel de diagosedagen als de follow-up dagen. Bij het genereren van deze roosters wordt rekening gehouden met de meeste voorwaarden die door het AMC gesteld zijn. De voorwaarden die niet verwerkt zijn, staan in de aanbevelingen voor verder onderzoek, paragraaf 5.3. De roosters kunnen worden weergegeven zoals in figuur 3 en 5. Het is wel aan te bevelen hier, in verband met de duidelijkheid, bij het daadwerkelijke gebruik de namen van de patiënt weer te geven in plaats van zijn nummer. Ook is het wellicht gebruiksvriendelijker als niet de begintijdsloten meegegeven worden maar de begintijdstippen.

Uit de simulaties met het planningsmodel kwam naar voren dat, afhankelijk van de benodigde afspraken van de patiënten, er twee of drie patiënten per dag ingepland kunnen worden. Dit strookt met de wens van het AMC om te willen beginnen met twee patiënten per dag. Ook is er, als naar het rooster gekeken wordt, de mogelijkheid om dat aantal patiënten te verhogen naar drie.

Daarnaast kwam uit de simulaties met het planningsmodel naar voren dat de voorwaarde dat een arts minimaal twee behandelingen per dag moet uitvoeren beperkend is voor de capaciteit op een NMA dag en het aantal gaten in de roosters van artsen en patiënten zal vergroten.

Uit de resultaten van het wiskundig model dat gemaakt is om de toegangstijd te bepalen komt naar voren dat de eis van een toegangstijd van maximaal twee maanden niet haalbaar is met twaalf diagnosedagen per jaar, twee patiënten per diagnosedag en een verwacht gemiddelde van twintig patiënten per jaar. Bij een capaciteit van drie patiënten zal de eis al een stuk beter gehaald worden. De resultaten van het model laten zien dat met een capaciteit van drie patiënten per diagnosedag ongeveer 90% van de patiënten een toegangstijd van onder de drie maanden heeft.

Als het aantal mogelijke diagnosedagen verhoogd wordt naar 24 per jaar, met een capaciteit van twee patiënten per dag, zal tenminste 85% van de patiënten een toegangstijd van maximaal twee maanden hebben. Dit komt omdat het NMA centrum dan flexibeler met plannen is en daardoor beter kan voldoen aan de vraag.

Zoals verwacht zal de toegangstijd in steeds grotere mate toenemen bij een vaste capaciteit en een toenemend aantal patiënten.

5.2 Aanbevelingen voor het AMC Amsterdam

Uit dit onderzoek zijn de volgende aanbevelingen voor het AMC uitgekomen:

- Het is wenselijk de eis dat een arts minimaal twee patiënten per NMA dag moet behandelen te versoepelen. Als deze eis versoepeld wordt kan de capaciteit van een dag omhoog doordat er meer verschillende combinaties van patiënten mogelijk zijn. Daarnaast gaat het aantal gaten in de roosters van de artsen en de patiënten omlaag.

- Als het gaat om de maximum behandeltijd van patiënten is het van belang dat er goed opgelet wordt als die maximumwaarde in de buurt ligt van de totale benodigde hoeveelheid behandeltijd van diezelfde patiënt. Als de maximale behandeltijd namelijk net onder de totale benodigde hoeveelheid behandeltijd ligt is het wellicht te overwegen de maximale behandeltijd iets te verhogen zodat die net boven de totale benodigde hoeveelheid ligt. Dit zorgt er namelijk voor dat een patiënt niet nog terug hoeft te komen voor die laatste afspraken en dat er geen extra beperkingen optreden in de combinaties van patiënten.

- Om de capaciteit van een dag te verhogen moet er niet meer gewacht worden op de uitslagen van een bloedonderzoek voordat een muldisciplinair overleg plaatsvind. Dit punt is belangrijker als aantal bezoekende patiënten groeit, omdat de MDO's dan langer gaan duren.

- De eis van een maximale toegangstijd van twee maanden kan met twaalf mogelijke diagnosedagen per jaar en twee patiënten per diagnosedag niet gehaald worden, uitgaande van gemiddeld twintig patiënten per jaar. Om aan deze eis te kunnen voldoen zou het aantal mogelijke diagnosedagen verhoogd moeten worden naar bijvoorbeeld 24 per jaar. Op deze manier is het NMA centrum flexibeler en kan er beter omgegaan worden met plotselinge vraag. Het daadwerkelijke aantal diagnosedagen zal niet groter worden. Ook kan er voor gekozen worden meer patiënten per diagnosedag te behandelen. Dit zal ook zorgen voor een vermindering van de wachttijd. Dit zal ook voor een verlaging van het aantal diagnosedagen zorgen.

- Bij een toekomstige groei van patiënten die op een diagnosedag willen komen, zal de toegangstijd steeds sneller groter worden. Om binnen de norm te blijven zal het aantal mogelijke diagnosedagen omhoog moeten en/of de capaciteit van een diagnosedag omhoog moeten.

5.3 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

In het onderzoek naar een planningsmodel zijn nog niet alle wensen van het AMC en de patiënten geïmplementeerd. Om beter aan deze wensen te kunnen voldoen zal er in een eventueel vervolgonderzoek gekeken moeten worden naar de volgende punten:

- Het aantal fysieke verplaatsingen van de patiënt op een behandeldag moet zo klein mogelijk blijven, omdat zo'n verplaatsing een patiënt veel moeite kan kosten. In de toekomst wil het AMC misschien overgaan naar een systeem waarbij een patiënt een aparte kamer krijgt. In dit systeem zullen de behandelaars naar de patiënt komen in plaats van andersom. De patiënt moet zich nog wel naar sommige onderzoeken verplaatsen die op een vaste locatie zitten, zoals bijvoorbeeld een MRI-scan.

- Het aantal keer in en uit de rolstoel moet zo klein mogelijk blijven. Het proces van in en uit de rolstoel gaan vaak lastig is voor de patiënt. Dit hangt samen met het aantal verplaatsingen van de patiënt.

- Een patiënt heeft af en toe pauze nodig. Gedurende drie uur mag een patiënt maximaal 2,5 uur behandeld worden.

- Om de lasten voor de patiënten te verlichten zal er tussen twee verschillende onderzoeken maximaal een uur mogen zitten. Dit om te voorkomen dat de patiënt een groot deel van de tijd zit te wachten. Momenteel is hieraan vaak al voldaan doordat er een rooster wordt gemaakt wat zo compact mogelijk is.

- Er moet rekening gehouden worden met de reistijd binnen het AMC, omdat sommige locaties ver van elkaar afliggen en sommige patiënten niet erg mobiel zijn. Op dit moment gaat het redelijk goed in het model omdat niet alle afspraken veelvouden van een kwartier duren. In de toekomst kan dit echter veranderen en zal er bewuster met locaties omgegaan moeten worden in het planningsmodel.

In het onderzoek naar de toegangstijd van het NMA centrum is het wiskundig model nog niet compleet. De volgende punten kunnen in een vervolgonderzoek onderzocht worden:

- In het wiskundig model is alleen de toegangstijd voor een diagnosedag onderzocht, het is ook wenselijk dit te bepalen voor een follow-updag.

- Alleen de toegangstijd van een diagnosedag met een vaste capaciteit is onderzocht. Er moet nog onderzocht worden wat de invloed van een variabele of stochastische capaciteit is. De kansverdeling van het aantal patiënten dat op een dag past moet ook nog nauwkeuriger bepaald worden.

- In het toegangstijdmodel wordt de correlatie tussen de wachttijd tot het eerste beslismoment en het moment van de acceptatie van de patiënt nog niet meegenomen. Het is wenselijk dit in vervolgonderzoek wel mee te nemen.

Gedurende het onderzoek zijn nog een aantal dingen aan het licht gekomen waarvan het wellicht wenselijk is om die verder te onderzoeken, maar waar wegens verschillende omstandigheden nog niet aan toe gekomen is. De gevonden punten zijn de volgende:

- Als een patiënt meerdere dagen naar het ziekenhuis moet komen om alle noodzakelijke afspraken te ondergaan, op welke manier kunnen deze afspraken dan het best verdeeld worden? Hier is van belang dat er eerst uitgezocht wordt welke patiënten meerdere dagen naar het ziekenhuis moeten komen. Vermoedelijk moet ook de mening van de specialisten op dit gebied uitgezocht worden.

- Het multidisciplinair overleg en de lunchpauze zijn momenteel handmatig ingepland afhankelijk van de door het model gegenereerde roosters. Dit kan natuurlijk ook met het programma gebeuren en dus variabel worden gehouden. Het vermoeden is dat dit de planning zal verbeteren.

Referenties

[1] Chern, C.C., Chien, P.S., & Chen, S.Y. (2008). A heuristic algorithm for the hospital health examination scheduling problem. *European Journal of Operational Research, 186,* 1137-1157. doi:10.1016/j.ejor.2007.02.029

[2] Flippo, L. (2010). NMA Centrum Adviesrapport Versie 0.3. Verkregen 11 maart 2010. Amsterdam.

[3] Kerngegevens 2008. Verkregen 6 april 2010. Van `http://www.amc.nl/?sid=219`

[4] Ross, S. M. (2007). *Introduction to Probability Models* (9th ed.). Burlington: Academic Press.

[5] Vereniging Spierziekten Nederland. Verkregen 19 april 2010. Van `http://www.vsn.nl`

[6] Winston, W. L. (1994). *Operations Research: Applications and Algorithms* (3rd ed.). Belmont: Duxbury Press