



Universiteit
Leiden

Postmortale weefseluitnames: centraal of decentraal?

Een analyse van personeelsinzet en donorverwerkingsgraad met optimalisatie en simulatie

Simone de Vos Burchart (s1746995)

Begeleiders:

Rudy van Vliet & Floske Spieksma & Dilesh Kishoendajal

BACHELORPROJECT– WISKUNDE EN INFORMATICA

Mathematisch Instituut

Leiden Institute of Advanced Computer Science (LIACS)

liacs.leidenuniv.nl

11 augustus 2026

Samenvatting

De Nederlandse weefseluitnameorganisatie WUON voert weefseluitnames uit met teams die naar donorlocaties reizen. Het uitvoeren van weefseluitnames op de donorlocatie heeft meerdere nadelen, en daardoor wordt gezocht naar alternatieven. In deze scriptie wordt het effect van verschillende vormen van centralisatie onderzocht op de donorverwerkingsgraad en de benodigde personeelsinzet.

Drie scenario's worden vergeleken: het huidige decentrale scenario, een gedeeltelijk centraal scenario waarin huid-, hartklep- en botdonoren naar een centraal uitnamecentrum worden vervoerd, en een volledig centraal scenario waarin alle donoren centraal worden behandeld. Hierbij wordt gebruikgemaakt van historische donorgegevens uit 2024 en 2025. De methodes gebruikt in dit onderzoek zijn gemengd-geheeltallige lineaire programmering (MILP) en een discrete-event simulatie met online heuristieken.

De resultaten laten zien dat het gedeeltelijk centrale scenario de hoogste donorverwerkingsgraad behaalt (99,5%, tegen 99,2% bij het decentrale scenario), en dat de personeelsinzet nauwelijks verschilt van die van het decentrale scenario. Het volledig centrale scenario presteert aanzienlijk minder goed: het aantal niet-verwerkte donoren neemt toe en ongeveer 73% meer personeelsuren zijn nodig. Deze verschillen worden veroorzaakt door de centralisatie van cornea-uitnames, vooral omdat hierdoor het aantal donortransporten sterk toeneemt. Voor hartklep- en botuitnames vermindert centralisatie de personeelsinzet, terwijl voor cornea- en huiduitnames deze toeneemt. Daarnaast blijkt dat heuristieken de theoretische ondergrenzen uit de MILP-modellen redelijk goed benaderen.

Inhoudsopgave

1	Introductie	1
1.1	Context en motivatie	1
1.2	Probleemstelling	1
1.3	Onderzoeksvraag	2
1.4	Onderzoeksaanpak	2
1.5	Overzicht van de scriptie	3
2	Achtergrond	4
2.1	De Nederlandse weefseldonatieketen	4
2.2	Weefseluitname in Nederland	4
2.3	Weefsel Uitname Organisatie Nederland	5
2.4	Mogelijke gevolgen van centralisatie	6
2.5	Ontwerp van de onderzochte scenario's	7
2.5.1	Gedeeltelijk centraal scenario	9
2.5.2	Volledig centraal scenario	10
3	Gerelateerd Werk	12
3.1	Zorglogistiek als routings- en roosterprobleem	12
3.2	Vehicle Routing Problems en aanvullende beperkingen	13
3.3	Dynamische en stochastische planning	13
3.4	Eerder onderzoek naar centralisatie van weefseluitname	14
4	Methodologie	15
4.1	Gemengd-geheeltallige lineaire programmering	15
4.1.1	Invoergegevens en parameters	15
4.1.2	Beslissingsvariabelen	17
4.1.3	Voorwaarden	18
4.1.4	Doelfunctie	21
4.1.5	Modelversterkende voorwaarden	22
4.1.6	Centralisatiemodel	24
4.1.7	Implementatie	24
4.1.8	Uitbreidend tijdsvenster iteratief model	25
4.1.9	Complexiteit	27
4.2	Simulatie met heuristieken	27
4.2.1	Invoergegevens	28
4.2.2	Simulatiemodel	29
4.2.3	Beslissingsmomenten en simulatieverloop	30
4.2.4	Toelaatbare toewijzingen	32
4.2.5	Gedeeltelijk centraal scenario	33
4.2.6	Heuristieken	34
4.2.7	Maatstaven	37

5	Experimenten	38
5.1	MILP-modellen	38
5.1.1	Decentraal scenario	39
5.1.2	Gedeeltelijk centraal scenario	39
5.1.3	Volledig centraal scenario	41
5.2	Vergelijking van de MILP-modellen	43
5.2.1	Donorverzameling	43
5.2.2	Totale personeelsinzet	44
5.2.3	Werkbelasting per dag	47
5.2.4	Analyse per weefseltype	49
5.2.5	Analyse per donortype	52
5.2.6	Reistijdanalyse	55
5.2.7	Conclusie	57
5.3	Simulatie met heuristieken	58
5.3.1	Donorverwerkingsgraad	58
5.3.2	Totale personeelsinzet	59
5.3.3	Analyse van de diensten	62
5.3.4	Vergelijking met de MILP-modellen	63
6	Discussie & Conclusie	67
6.1	Belangrijkste bevindingen	67
6.2	Implicaties voor WUON	68
6.3	Beperkingen van het onderzoek	68
6.4	Toekomstig onderzoek	70
	References	72

1 Introductie

Deze inleiding beschrijft eerst het belang van dit onderzoek, gevolgd door de probleemstelling en onderzoeksvraag, de onderzoeksaanpak, en ten slotte een overzicht van de rest van de scriptie.

1.1 Context en motivatie

Gedoneerde oogweefsels, huid, hartkleppen en botweefsels worden gebruikt voor uiteenlopende behandelingen, zoals bij herstel na ernstige brandwonden of bij oogheelkundige ingrepen en hartchirurgie. Voor veel patiënten leidt een transplantatie tot een verbetering van de kwaliteit van leven. Jaarlijks komen in Nederland duizenden patiënten in aanmerking voor een behandeling met donorweefsel [4].

De omvang van het donatieproces laat zien hoe belangrijk weefseldonatie is. In 2025 werden in Nederland bij 3.633 overleden donoren één of meer typen weefsel uitgenomen, een recordaantal. In dat jaar werden meer dan 1.400 oogweefseltransplantaties en ruim 100 transplantaties met hartkleppen of bloedvaten uitgevoerd [4].

Ondanks deze aantallen is er nog steeds een tekort aan bepaalde typen donorweefsel. Op 1 september 2025 stonden in Nederland 1.136 patiënten op de wachtlijst voor oogweefseltransplantatie en 14 patiënten op de wachtlijst voor hartkleppen en bloedvaten [4]. Dit tekort laat de behoefte aan een goed werkend uitnameproces zien.

Achter iedere succesvolle weefseltransplantatie zit een logistiek proces, waarin weefsels binnen beperkte tijdsvensters moeten worden uitgenomen, vervoerd en verwerkt. De uitnameteams hebben verschillende bevoegdheden, waar in de planning ook rekening mee moet worden gehouden. Een efficiënte planning maken is niet alleen vanwege de kosten van belang, maar ook om zoveel mogelijk gedoneerd weefsel beschikbaar te stellen voor patiënten.

In Nederland worden postmortale weefseluitnames uitgevoerd door de Weefsel Uitname Organisatie Nederland (WUON). Deze organisatie onderzoekt de mogelijkheden om de huidige werkwijze efficiënter in te richten. Een van de voorgestelde richtingen is het volledig of gedeeltelijk centraliseren van onderdelen van het uitnameproces. Deze scriptie richt zich op de vraag welke gevolgen centralisatie heeft voor de benodigde personeelsinzet en het aantal donoren dat verwerkt kan worden.

1.2 Probleemstelling

Momenteel worden weefseluitnames in Nederland decentraal uitgevoerd. Nadat een donor is geaccepteerd, reist een gespecialiseerd uitnameteam naar de donorlocatie, doorgaans een ziekenhuis of mortuarium, waar de schouw, voorbereiding en uitname plaatsvinden. Donoren bevinden zich verspreid over het hele land, waardoor uitnameteams grote afstanden moeten afleggen om de donoren te bereiken. De uitnameteams starten in Oude Meer of Nijmegen en kunnen vervolgens meerdere donorlocaties bezoeken in hun dienst.

Deze werkwijze brengt meerdere uitdagingen met zich mee. Teams besteden een groot deel van hun werktijd aan reizen in plaats van aan uitnamewerkzaamheden. Daarnaast vereisen sommige uitnames specifieke faciliteiten die niet altijd direct beschikbaar zijn. Ook verschillen de benodigde teamgrootte, duur en complexiteit sterk per type weefseluitname.

In een gecentraliseerde werkwijze reizen niet langer de uitnameteams naar de donor, maar wordt de donor naar een centrale locatie gebracht voor (een deel van) de uitnameprocedure. Hierdoor kunnen uitnameteams meer tijd besteden aan uitnamewerkzaamheden en minder aan reizen. Daarnaast kunnen faciliteiten, materialen en expertise op één locatie worden geconcentreerd.

Centralisatie kent echter ook nieuwe logistieke uitdagingen. Het vervoer van donoren vereist extra reistijd en introduceert aanvullende processtappen. De werkzaamheden van transportteams en uitnameteams moeten bovendien zorgvuldig op elkaar worden afgestemd. Hoewel centralisatie de benutting van gespecialiseerde uitnameteams mogelijk verbetert, is het niet direct duidelijk wat het netto effect is op de totale personeelsinzet en de donorverwerkingsgraad.

1.3 Onderzoeksvraag

Het doel van het huidige onderzoek is om te bepalen welke invloed centralisatie van weefseluitnames heeft op het uitnameproces. Daarbij worden verschillende scenario's vergeleken, variërend van de huidige decentrale werkwijze tot gedeeltelijk en volledig gecentraliseerde alternatieven.

De centrale onderzoeksvraag luidt:

Wat is het effect van centralisatie van weefseluitnames op de benodigde personeelsinzet en de donorverwerkingsgraad?

Om deze vraag te beantwoorden worden de volgende deelvragen onderzocht:

1. Welke verwerkingsgraad is theoretisch maximaal haalbaar, en welke personeelsinzet is daarbij theoretisch minimaal nodig binnen de scenario's? Welke scenario's leveren op basis van deze theoretische analyse de gunstigste resultaten op?
2. Welke verwerkingsgraad is maximaal haalbaar en welke personeelsinzet is daarbij minimaal nodig wanneer planningsbeslissingen online moeten worden genomen op basis van de informatie die op dat moment beschikbaar is? In welke mate verschillen de resultaten van een realistische online planning van de theoretische ondergrenzen?

1.4 Onderzoeksaanpak

Het onderzoek bestaat uit twee delen: een theoretische analyse van de donorverwerkingsgraad en de minimaal benodigde personeelsinzet, en een analyse onder realistische omstandigheden.

Als eerste worden optimalisatiemodellen ontwikkeld voor de verschillende scenario's. Deze modellen gaan uit van volledige kennis van alle donoren binnen het beschouwde tijdsvenster. Per scenario wordt eerst de maximaal haalbare donorverwerkingsgraad bepaald, en vervolgens de minimaal benodigde personeelsinzet om die verwerkingsgraad te realiseren. Dit levert een theoretische ondergrens op voor de benodigde personeelsinzet. Hiermee wordt vastgesteld in hoeverre centralisatie kan leiden tot een efficiëntere inzet van personeel.

Vervolgens wordt voor het meest veelbelovende centralisatiescenario een simulatiemodel ontwikkeld waarin donoren online worden toegewezen aan teams. In tegenstelling tot bij de optimalisatiemodellen zijn toekomstige donoraankomsten hierbij niet vooraf bekend. Hierdoor ontstaat een realistischer beeld van de prestaties die in de praktijk haalbaar zijn. Binnen deze simulatie worden meerdere heuristieken onderzocht voor het plannen van donoren en teams.

1.5 Overzicht van de scriptie

Hoofdstuk 2 beschrijft de achtergrond van het onderzoek, waaronder de huidige weefseldonatieketen en de centralisatiescenario's.

Hoofdstuk 3 bespreekt gerelateerd werk op het gebied van zorglogistiek, routing- en planningsproblemen en operationele besluitvorming onder onzekerheid. Daarnaast wordt eerder onderzoek naar centralisatie van weefseluitname besproken.

Hoofdstuk 4 beschrijft de methodologie van het onderzoek, van zowel de optimalisatiemodellen als de simulatie en de heuristieken.

Hoofdstuk 5 bevat de resultaten: eerst de uitkomsten van de optimalisatiemodellen, vervolgens de resultaten van de simulatie-experimenten en ten slotte een vergelijking van de twee.

Ten slotte bevat Hoofdstuk 6 een discussie van de resultaten. Hierbij worden de belangrijkste bevindingen samengevat, aanbevelingen voor de WUON geformuleerd, beperkingen van het onderzoek besproken en richtingen voor toekomstig onderzoek voorgesteld.

Dit onderzoek is uitgevoerd als bachelorproject van de opleidingen Wiskunde en Informatica aan het Mathematisch Instituut en het Leiden Institute of Advanced Computer Science (LIACS) van de Universiteit Leiden, in samenwerking met de Nederlandse Transplantatie Stichting (NTS) en WUON. De scriptie is begeleid door Floske Spieksma en Rudy van Vliet van Universiteit Leiden, en Dilesh Kishoendajal van de NTS.

2 Achtergrond

Dit hoofdstuk beschrijft eerst het huidige donatie- en uitnameproces en gaat vervolgens in op de organisatie van de uitnameteams. Daarna worden de mogelijke gevolgen van centralisatie besproken en worden de precieze scenario's geïntroduceerd die in de rest van deze scriptie worden geanalyseerd.

2.1 De Nederlandse weefseldonatieketen

De Nederlandse Transplantatie Stichting (NTS) is verantwoordelijk voor de landelijke coördinatie van de orgaan- en weefseldonatieketen in Nederland. In opdracht van het ministerie van Volksgezondheid, Welzijn en Sport (VWS) bewaakt de NTS de kwaliteit, doelmatigheid en continuïteit van het donatie- en transplantatieproces. Daarnaast voert de NTS via het Orgaancentrum diverse wettelijke taken uit op basis van de Wet op de orgaandonatie en de Wet veiligheid en kwaliteit lichaamsmateriaal [7, 5].

Weefseldonatie begint wanneer een potentiële donor wordt geïdentificeerd door een medisch professional. Het Orgaancentrum van de NTS raadpleegt vervolgens het Donorregister en beoordeelt of donatie medisch mogelijk is. Na overleg met de nabestaanden en een aanvullend medisch onderzoek kan een donor worden geaccepteerd voor weefseldonatie [7, 5].

Na acceptatie van een donor coördineert de NTS de verdere procedure. De weefseluitnames worden uitgevoerd door de Weefsel Uitname Organisatie Nederland (WUON). Tijdens dit proces worden ook bloedmonsters afgenomen voor laboratoriumonderzoek. Na de uitname worden de weefsels vervoerd naar weefselbanken, waar zij worden gekeurd, bewerkt en opgeslagen totdat zij voor transplantatie kunnen worden vrijgegeven [7].

De NTS beheert daarnaast de wachtlijsten en allocatieregels voor cornea's en hartkleppen. Voor andere typen donorweefsel verloopt de toewijzing via de betrokken weefselbanken. Na vrijgave kunnen de weefsels worden getransplanteerd in gespecialiseerde behandelcentra in Nederland of, indien nodig, worden uitgewisseld met buitenlandse partners [7, 5].

2.2 Weefseluitname in Nederland

Binnen de Nederlandse weefseldonatieketen worden vier typen postmortale weefseldonaties onderscheiden: cornea (hoornvlies), huid, hartkleppen en botweefsel. De medische toepassingen verschillen sterk per weefseltype. Cornea's worden gebruikt om het zicht van patiënten te herstellen, huidweefsel wordt toegepast bij de behandeling van brandwonden, hartkleppen worden gebruikt bij hartchirurgie en botweefsel wordt onder meer toegepast bij orthopedische ingrepen [6].

Na acceptatie van een donor wordt een uitnameteam naar de donorlocatie gestuurd. Daar vindt eerst een identificatie van de donor plaats, gevolgd door een schouw (lichamelijke inspectie) en bloedafname. Op basis van de schouw of laboratoriuminformatie kan alsnog blijken dat bepaalde weefsels niet geschikt zijn voor transplantatie. Hierdoor kunnen uiteindelijk minder of zelfs geen weefsels van de donor gebruikt worden [6]. Wanneer meerdere typen weefsel worden geaccepteerd, kunnen bij één donor verschillende uitnameactiviteiten worden gecombineerd.

Voor de kwaliteit van donorweefsel gelden strikte tijdslimieten. De uitname moet uiterlijk 24 uur na overlijden starten. Daarom wordt het tijdstip van circulatiestop (het moment waarop de bloedcirculatie definitief stopt) meegenomen in de planning van uitnameteams [6].

Zoals eerder beschreven worden de weefsels na de uitname naar een weefselbank vervoerd voor keuring, bewerking en opslag. Bloedmonsters van de donor worden onderzocht in een laboratorium

om overdraagbare aandoeningen uit te sluiten. Afhankelijk van het type weefsel kan het weken tot jaren worden opgeslagen voordat het aan een patiënt wordt toegewezen [7].

2.3 Weefsel Uitname Organisatie Nederland

Tenzij anders vermeld, zijn de gegevens in deze paragraaf afkomstig uit interviews, werkoverleggen en interne documentatie die tijdens het onderzoek ter beschikking zijn gesteld door medewerkers van de Nederlandse Transplantatie Stichting (NTS) en de Weefsel Uitname Organisatie Nederland (WUON).

WUON is verantwoordelijk voor alle postmortale weefseluitnames in Nederland. In opdracht van de NTS verzorgt de organisatie de schouw, bloedafname, uitname van donorweefsel en de eerste verwerking van de uitgenomen weefsels voordat deze naar een weefselbank worden vervoerd.

Om de verschillende typen uitnames uit te voeren beschikt WUON over gespecialiseerde uitnameteams. De teams verschillen in bevoegdheden, waarbij een hoger gespecialiseerd team ook de taken van minder gespecialiseerde teams mag uitvoeren. Tabel 1 geeft een overzicht van deze bevoegdheden. De teams vormen een hiërarchie van specialisatieniveaus, waarbij botteams het hoogste niveau hebben en corneateams het laagste.

Teamtype	Niveau	Bevoegd voor
Corneateam	1	Cornea
Huidteam	2	Huid, cornea
Hartklepteam	3	Hartkleppen, huid, cornea
Botteam	4	Alle weefsels

Tabel 1: Bevoegdheden van de verschillende uitnameteams.

In deze scriptie worden teamtypes ook wel gelabeld met het niveau, bijvoorbeeld teamtype 1 is een corneateam.

De dagelijkse bezetting van WUON bestaat uit drie corneateams, twee huidteams, één hartklepteam en één botteam. Tabel 2 bevat onder andere de thuisbases en diensturen van de verschillende teams.

Teamtype	Aantal	Thuisbasis	Dienst	Maximale dienstduur	Team grootte
Corneateam (nacht)	1	Nijmegen	20:00–08:00	9 uur	2
Corneateam (dag)	2	Oude Meer	08:00–18:00 / 10:00–20:00	10 uur	2
Huidteam	2	Oude Meer	08:00–18:00 / 10:00–20:00	10 uur	2
Hartklepteam	1	Oude Meer	24-uursdienst	12 uur	4
Botteam	1	Oude Meer	24-uursdienst	14 uur	6

Tabel 2: Overzicht van de uitnameteams van WUON.

Ieder team heeft aan het begin van een dienst een vaste opstarttijd. Deze tijd wordt gebruikt voor onder meer het controleren van materialen, het inladen van het voertuig en administratieve voorbereidingen. Voor alle teams kost deze opstarttijd 30 minuten. Het botteam vormt hierop een

uitzondering en hanteert een opstarttijd van 60 minuten vanwege de grotere hoeveelheid materiaal die voor botuitnames nodig is.

Het uitnameteam wordt toegewezen op basis van het hoogst gespecialiseerde geaccepteerde weefsel van een donor. Hierdoor kan een donor van wie zowel cornea als botweefsel is geaccepteerd uitsluitend door een botteam worden behandeld. Het toegewezen team reist naar de donorlocatie, waar zoals eerder beschreven eerst de identiteit wordt gecontroleerd, gevolgd door de schouw en bloedafname. Gemiddeld duurt deze voorbereidingstijd tussen aankomst op de donorlocatie en de start van de uitname ongeveer 30 minuten. Wanneer tijdens de schouw of bloedafname afwijkingen worden geconstateerd, vindt overleg plaats met WUON en/of de NTS. Hierdoor kunnen vertragingen van tientallen minuten tot enkele uren ontstaan.

De huidteams werken uitsluitend overdag. Huiduitnames die in de nacht moeten plaatsvinden worden daarom normaal gesproken uitgevoerd door het hartklepteam.

Indien meerdere typen weefsel van dezelfde donor worden uitgenomen, gebeurt dit volgens een vaste volgorde: hartklep $\rightarrow$ huid $\rightarrow$ cornea $\rightarrow$ bot.

Na afloop van de uitname wordt het lichaam gereconstrueerd, zodat het kan worden overgedragen aan de nabestaanden of uitvaartverzorger. De uitgenomen weefsels worden naar de betreffende weefselbank vervoerd voor verdere kwaliteitscontrole, bewerking en opslag. De afgenomen bloedmonsters worden verzonden voor aanvullend laboratoriumonderzoek om overdraagbare aandoeningen uit te sluiten.

De duur van een uitname verschilt sterk tussen de verschillende typen weefsel. Tabel 3 geeft een overzicht van de parameters die in de modellen van deze scriptie worden gebruikt, waarbij de uitnameduur door WUON is geschat.

Weefsel	Minimaal vereist teamtype	Geschatte uitnameduur (uur)
Cornea	Corneateam	0,75
Huid	Huidteam	1,50
Hartkleppen	Hartklepteam	2,00
Bot	Botteam	6,00

Tabel 3: Operationele parameters van de verschillende weefseltypen.

De weergegeven uitnameduren betreffen uitsluitend de uitname zelf (inclusief reconstructie) en bevatten niet de voorbereidingstijd van gemiddeld 30 minuten die voorafgaat aan iedere uitname.

De combinatie van reistijd, beperkte beschikbaarheid van teams en verschillen in de vereiste faciliteiten maakt de planning van weefseluitnames ingewikkeld. In de volgende paragrafen wordt besproken hoe centralisatie dit kan beïnvloeden.

2.4 Mogelijke gevolgen van centralisatie

Centralisatie van weefseluitnames kan verschillende voordelen bieden. Zoals in Paragraaf 1.2 werd besproken, krijgen de uitnameteams relatief meer tijd voor uitnameactiviteiten. Een uitnamecentrum kan daarnaast beschikken over speciaal ingerichte faciliteiten voor uitnames, waardoor de afhankelijkheid van lokale voorzieningen afneemt. Dit is met name relevant voor botuitnames, waarvoor een steriele operatiekamer nodig is, en voor huiduitnames, waarvoor de beschikbare

faciliteiten op de donorlocaties niet altijd goed genoeg zijn. Ook zou centralisatie kunnen leiden tot een efficiëntere planning van gespecialiseerde teams en tot gunstigere werktijden voor medewerkers.

Tegenover deze voordelen staan ook nadelen. Wanneer uitnames niet meer op de donorlocatie plaatsvinden, moeten donoren naar een uitnamecentrum worden vervoerd. Zoals besproken in Paragraaf 1.2, vereist dit extra transporten, aanvullende coördinatie en mogelijk extra personeel. Daarnaast moeten voertuigen geschikt worden gemaakt voor donortransport en moet een uitnamecentrum worden ingericht en beheerd. Verder ontstaan er nieuwe afhankelijkheden tussen transportteams en uitnameteams, waardoor de planning moeilijker wordt. Ten slotte kan centralisatie gevolgen hebben voor nabestaanden, doordat de donor tijdelijk naar een andere locatie wordt vervoerd voordat het lichaam wordt teruggebracht voor de verdere uitvaartverzorging.

Dit zijn aspecten die WUON in een kosten-batenanalyse zou moeten onderzoeken. Het huidige onderzoek richt zich enkel op de donorverwerkingsgraad en personeelsinzet.

2.5 Ontwerp van de onderzochte scenario's

Een belangrijke ontwerpkeuze binnen dit onderzoek is de mate van centralisatie van de uitnameactiviteiten. Zoals besproken in de vorige paragraaf, kan centralisatie voordelen bieden doordat gespecialiseerde faciliteiten en personeel op één locatie worden samengebracht. Daartegenover staat extra vervoer van en naar een uitnamecentrum.

Om deze afweging te onderzoeken zijn drie scenario's ontwikkeld: een volledig decentraal scenario, een gedeeltelijk centraal scenario en een volledig centraal scenario. Het decentrale scenario benadert de huidige werkwijze en dient als referentiesituatie. Bij het volledig centrale scenario vinden alle uitnames op één uitnamecentrum plaats. Het gedeeltelijk centrale scenario is een tussenvariant waarbij alleen de donortypen worden gecentraliseerd waarvoor op basis van de beschikbare informatie voordelen worden verwacht.

Bij centralisatie moet ook worden bepaald of de schouw en bloedafname nog op de donorlocatie plaatsvinden, of pas in het uitnamecentrum. In dit onderzoek is gekozen voor schouw en bloedafname op de donorlocatie, wat onderbouwd wordt door data uit de jaren 2024-2025.

Tabel 4 laat zien dat de uiteindelijk uitgenomen weefsels (na schouw en bloedafname) regelmatig afwijken van de oorspronkelijke acceptatie (bij de donoraanmelding).

Om de gevolgen voor de benodigde uitnameteams inzichtelijker te maken, zijn de combinaties uit Tabel 4 geaggregeerd naar teamniveau in Tabel 5. Tabel 5 toont de relatie tussen het op basis van de acceptatie vereiste uitnameteam en het uiteindelijk benodigde uitnameteam. Hierbij komt niveau 0 overeen met donoren waarbij uiteindelijk geen weefsel werd uitgenomen. Een acceptatieniveau 0 komt niet voor in deze tabellen, omdat uitsluitend donoren worden beschouwd van wie ten minste één weefsel voorafgaand aan de schouw is geaccepteerd.

Uit Tabel 5 blijkt dat het uiteindelijk benodigde uitnameteamniveau regelmatig lager is dan op basis van de acceptatie verwacht zou worden. Van de 374 donoren voor wie op basis van de acceptatie een botteam (niveau 4) nodig was, bleek uiteindelijk slechts 75,1% daadwerkelijk een botteam nodig te hebben. Bij het huidteam ligt dat nog lager, op 62,3%. Daarnaast werd bij 700 van de donoren (10,2%) uiteindelijk geen weefsel uitgenomen.

Deze resultaten zijn een belangrijke motivatie om de schouw op de donorlocatie uit te voeren. Door eerst de geschiktheid van de donor te beoordelen kan worden voorkomen dat onnodig gespecialiseerde teams worden opgeroepen of dat donoren onnodig worden vervoerd.

	BHC	BH	BSC	BS	BC	B	HSC	HS	HC	H	SC	S	C	Geen	Totaal
BHSC	0	0	0	1	0	0	5	1	1	0	1	1	0	0	10
BHS	-	0	-	0	-	0	-	1	-	0	-	0	-	0	1
BHC	96	2	-	-	3	1	-	-	6	1	-	-	10	10	129
BH	-	23	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	3	28
BSC	-	-	14	3	23	1	-	-	-	-	3	0	4	8	56
BS	-	-	-	1	-	9	-	-	-	-	-	0	-	0	10
BC	-	-	-	-	82	5	-	-	-	-	-	-	14	15	116
B	-	-	-	-	-	16	-	-	-	-	-	-	-	8	24
HSC	-	-	-	-	-	-	49	4	37	4	2	0	8	4	108
HS	-	-	-	-	-	-	-	11	-	4	-	1	-	4	20
HC	-	-	-	-	-	-	-	-	68	3	-	-	10	10	91
H	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25	-	-	-	5	30
SC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	503	37	267	70	877
S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	125	-	65	190
C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4698	498	5196
Totaal	96	25	14	5	108	33	54	17	112	38	509	164	5011	700	6886

Tabel 4: Tabel van geaccepteerde (voor de schouw en bloedafname) en uiteindelijk uitgenomen weefselcombinaties van alle donoren in de periode 2024-2025. De afkortingen staan voor: B = bot, H = hartkleppen, S = huid en C = cornea. De kolom Geen telt de donoren van wie uiteindelijk geen enkel weefsel is uitgenomen. De geaccepteerde combinaties (rijen) en uitgenomen combinaties (kolommen) zijn gegroepeerd naar het hoogst gespecialiseerde weefsel binnen de combinatie, dat bepalend is voor het vereiste uitnameteam. Een streepje (-) geeft een onmogelijke combinatie aan. Uitgenomen combinaties die niet voorkomen in de data zijn niet weergegeven.

Acceptatie teamniveau	Uiteindelijk benodigd teamniveau					Totaal
	4	3	2	1	0	
4	281 (75,1%)	16 (4,3%)	5 (1,3%)	28 (7,5%)	44 (11,8%)	374
3	-	205 (82,3%)	3 (1,2%)	18 (7,2%)	23 (9,2%)	249
2	-	-	665 (62,3%)	267 (25,0%)	135 (12,7%)	1067
1	-	-	-	4698 (90,4%)	498 (9,6%)	5196
Totaal	281	221	673	5011	700	6886

Tabel 5: Aggregatie van Tabel 4 naar benodigd teamniveau. Het op basis van de acceptatiecriteria vereiste teamniveau wordt vergeleken met het uiteindelijk benodigde teamniveau op basis van de uitgenomen weefsels in de periode 2024-2025. Niveau 0 correspondeert met een schouwteam zonder daaropvolgende uitname. Percentages zijn berekend ten opzichte van het totaal aantal donoren binnen het geaccepteerde teamniveau.

2.5.1 Gedeeltelijk centraal scenario

Van alle donoren in de onderzoeksperiode werd 75,5% uitsluitend voor corneadonatie geaccepteerd (5196 van de 6886 donoren), zie Tabel 4 en 5. Cornea-uitname is een relatief eenvoudige en korte procedure die doorgaans onder de bestaande omstandigheden op de donorlocatie kan worden uitgevoerd. Wanneer ook deze donoren zouden worden gecentraliseerd, zou voor bijna alle donoren aanvullend transport nodig zijn. Om die reden is besloten cornea-uitnames in het gedeeltelijk centrale scenario decentraal te organiseren. Hierdoor blijft voor 75,5% van de donoren de bestaande decentrale werkwijze behouden.

Voor de overige donortypen heeft centralisatie naar verwachting meer voordelen. Voor huid is de kwaliteit van de faciliteiten een belangrijk voordeel, en voor bot de beschikbaarheid van een steriele uitnameomgeving. Daarnaast kunnen de schouw en het transport voor bot- en hartklepdonoren worden uitgevoerd door een kleiner team dan uiteindelijk voor de uitname nodig zou kunnen zijn, waardoor reistijd en personeelsinzet worden beperkt. Op basis van deze overwegingen is ervoor gekozen om bot-, hartklep- en huiduitnames in het gedeeltelijk centrale scenario in een uitnamecentrum te laten plaatsvinden, maar met de schouw al op de donorlocatie. Hierdoor hoeft een donor die uiteindelijk niet geschikt blijkt voor uitname of enkel voor cornea-uitname niet onnodig naar het uitnamecentrum vervoerd te worden.

Het uitvoeren van een schouw op de donorlocatie vereist dat een getraind team de donorlocatie bezoekt voordat bekend is of transport naar het uitnamecentrum nodig is. Voor het verrichten van een schouw en het eventueel vervoeren van één donor is een team van twee personen voldoende. Wanneer meerdere donoren tegelijkertijd zouden worden vervoerd, zou ten minste een derde medewerker nodig zijn om het donortransportvoertuig niet onbeheerd achter te laten tijdens de schouw of overdracht.

Wanneer cornea-uitname decentraal blijft plaatsvinden en donoren bij wie uiteindelijk geen weefsel kan worden uitgenomen niet worden vervoerd, blijven op basis van de gegevens uit 2024-2025 in totaal 1175 (17,1%) donoren over voor vervoer naar het uitnamecentrum. Verdeeld over de 731 dagen in de onderzochte periode komt dit neer op gemiddeld slechts 1,6 donoren per dag. Daarnaast moeten deze donoren binnen beperkte tijdslimieten worden vervoerd en hun weefsels uitgenomen. Daardoor is de kans klein dat meerdere transportdonoren gelijktijdig beschikbaar zijn voor vervoer in hetzelfde voertuig. Bovendien moeten donoren die voor gezamenlijk vervoer in aanmerking zouden komen niet alleen binnen korte tijd van elkaar beschikbaar zijn, maar zich ook geografisch dicht bij elkaar bevinden, om gezamenlijk transport efficiënt te maken. Gegeven het beperkte aantal transportdonoren per dag wordt verwacht dat het zelden gunstig zou zijn om grotere voertuigen voor gelijktijdig donortransport in te zetten. Om deze redenen is binnen het gedeeltelijk centrale scenario gekozen voor tweepersoonsteams die zowel de schouw als het eventuele donortransport uitvoeren, met maximaal één donor tegelijk.

Indien de schouw niet op de donorlocatie zou plaatsvinden, zouden ook donoren bij wie uiteindelijk geen bot-, hartklep- of huidweefsel wordt uitgenomen naar het uitnamecentrum worden vervoerd. In dat geval zouden 1690 donoren (24,5%) transport vereisen in plaats van 1175 (17,1%). Het vooraf verrichten van de schouw voorkomt daarmee transport van ongeveer 515 donoren (30% van de anders te vervoeren donoren).

Vervolgens is de vraag welke teams de schouw en het donortransport uitvoeren. Omdat cornea-uitname in het gedeeltelijk centrale scenario decentraal blijft georganiseerd, blijven corneateams dagelijks donorlocaties door het hele land bezoeken. Deze teams bestaan uit twee personen en zijn

al bevoegd om de schouw van corneadonoren uit te voeren. Daarom is ervoor gekozen om in de modellen de schouw en het transport door deze teams te laten verrichten, met de aanname dat zij ook de schouw kunnen uitvoeren voor de overige weefseltypes.

Een belangrijk voordeel van deze keuze is dat donortransport regelmatig kan worden gecombineerd met reeds geplande ritten. Wanneer een corneateam aan het einde van een dienst een donor bezoekt die naar het uitnamecentrum moet worden vervoerd, kan deze donor worden meegenomen op de terugweg richting de thuisbasis. Op dezelfde manier kan een donor aan het begin van een dienst worden afgeleverd voordat de reguliere route wordt vervolgd. Hierdoor wordt verwacht dat het donortransport slechts beperkte extra reistijd veroorzaakt vergeleken met afzonderlijke heen-en-weerritten.

Deze werkwijze heeft ook enkele nadelen. Ten eerste moeten de corneateams beschikken over voertuigen die geschikt zijn voor donortransport. Ten tweede is aanvullende training nodig zodat de teams ook schouwen voor andere donortypen mogen uitvoeren.

Door de aanvullende schouw- en transporttaken zullen de corneateams in het gedeeltelijk centrale scenario meer donoren bezoeken dan in de huidige werkwijze. In plaats van hoogstens alleen de 5196 corneadonoren bezoeken zij alle 6886 donoren uit de onderzoeksperiode. Hierdoor nemen reistijd, schouwtijd en donortransporttijd toe voor deze teams. Om deze extra werkuren op te vangen zijn in dit scenario twee extra corneateams toegevoegd, gebaseerd op de resultaten van beperkte optimalisatie-experimenten. De overige uitnameteams zijn ongewijzigd gelaten. Hoewel in een daadwerkelijke implementatie mogelijk een andere personeelssamenstelling van het uitnamecentrum gunstiger zou zijn, valt een verdere optimalisatie daarvan buiten dit onderzoek.

2.5.2 Volledig centraal scenario

Om de verschillende scenario's zo goed mogelijk vergelijkbaar te houden, is in het volledig centrale scenario dezelfde werkwijze gebruikt als in het gedeeltelijk centrale scenario. Donoren worden eerst op de donorlocatie geschouwd door een tweepersoonstransportteam en daarna indien nodig naar het uitnamecentrum vervoerd. Elk team vervoert maximaal één donor tegelijk en voert tijdens het vervoeren van een donor geen andere tussenstops uit.

Bij volledige centralisatie zouden alternatieve oplossingen, zoals het gelijktijdig vervoeren van meerdere donoren, mogelijk efficiënter kunnen zijn, maar dat valt buiten dit onderzoek. Tijdens gesprekken met WUON werd aangegeven dat bij daadwerkelijke centralisatie mogelijk gebruik zou worden gemaakt van transport door de lokale mortuaria. Dit sluit goed aan bij de in dit onderzoek gekozen werkwijze van vervoer per individuele donor. Bij vervoer door mortuaria zou de schouw echter pas in het uitnamecentrum plaatsvinden, waardoor het aantal te transporteren donoren toeneemt.

Voor het volledig centrale scenario is gekozen voor acht transportteams van twee personen. Tijdens de modelontwikkeling bleek dat een kleiner aantal transportteams resulteerde in een substantieel aantal donoren dat niet kon worden ingepland: bij zeven transportteams was de donorverwerkingsgraad slechts 93,9%. In de periode 2024-2025 zouden 6186 donoren moeten worden vervoerd, dat is gemiddeld 8,5 donortransporten per dag. Dit gemiddelde geeft echter geen goed beeld van de piekbelasting op drukke dagen. Acht transportteams zijn daarom niet noodzakelijk om de gemiddelde vraag te verwerken, maar om ook op drukke dagen een groot deel van de beschikbare donoren te kunnen bezoeken. Met acht transportteams kon uiteindelijk ongeveer 96% van de donoren worden verwerkt. Dat werd voor dit onderzoek voldoende geacht, gegeven de afweging dat

elk extra team de tijdsduur verhoogt om een optimaal schema te berekenen.

In het model zijn de volgende parameters gebruikt. Alle transportteams hebben hun thuisbasis op het uitnamecentrum, behalve één nachtteam in Nijmegen (zoals nu ook bij WUON). Vier teams werken tussen 8:00 en 20:00, de andere vier tussen 20:00 en 8:00, met een maximale dienstduur van 9 uur en een teamgrootte van twee personen. De opstarttijd bedraagt 6 minuten aan het begin van de dienst. Dat is korter dan bij de teams in de andere scenario's die ook uitnames verrichten, omdat deze transportteams zich niet op uitnames hoeven voor te bereiden.

Omdat cornea-uitnames in dit scenario centraal plaatsvinden en corneateams dus geen reistijd meer hebben, zijn twee corneateams voldoende in plaats van de drie teams die nu door WUON worden ingezet.

3 Gerelateerd Werk

De organisatie van weefseluitname combineert elementen van personeelsplanning en routeplanning. Hoewel er weinig studies te vinden zijn over de organisatie van weefseluitnames, zijn er wel overeenkomsten met verschillende onderzoeksgebieden binnen de zorglogistiek en besliskunde. In dit hoofdstuk wordt besproken hoe de planning van weefseluitnameteams gerelateerd is aan de literatuur over mobiele zorgteams, routeringsproblemen, dynamische planning en eerdere onderzoeken naar centralisatie van weefseluitname.

3.1 Zorglogistiek als routerings- en roosterprobleem

Zorglogistiek richt zich op het optimaliseren van processen binnen de gezondheidszorg. Hierbij gaat het bijvoorbeeld om de inzet van personeel, het plannen van werkzaamheden en het organiseren van transport. Volgens Euchi et al. [3] behoren zorgsystemen tot de meest complexe productiesystemen. Hierdoor is de toepassing van besliskunde al jarenlang een groot onderzoeksgebied binnen de gezondheidszorg [3].

Een belangrijke toepassing binnen de zorglogistiek betreft thuiszorg, oftewel Home Health Care (HHC) [3]. Hierbij reizen zorgverleners naar patiënten toe om medische of ondersteunende zorg te leveren. Hoewel bij WUON de vraag juist is of centraliseren efficiënter zou zijn dan de huidige decentrale werkwijze, is dit een zelfde soort probleem. Euchi et al. [3] schrijven dat thuiszorg in veel situaties goedkoper, gebruiksvriendelijker en minstens even effectief kan zijn als zorg in een ziekenhuis of verpleeginstelling. Er is al lange tijd interesse in de vraag hoe dit soort werk efficiënt kan worden gepland [3].

Dit is een logistiek vraagstuk waarbij personeel verschillende locaties moet bezoeken. De volgorde waarin locaties worden bezocht beïnvloedt de totale reistijd, de werkbelasting van medewerkers en het aantal patiënten dat tijdens een dienst kan worden bezocht. Het bepalen van efficiënte routes vormt daarom een klassiek routeringsprobleem [3]. In de praktijk is echter niet alleen de route van belang. Bezoeken moeten vaak binnen bepaalde tijdsvensters plaatsvinden, medewerkers hebben verschillende vaardigheden en de totale hoeveelheid werkzaamheden moeten binnen de beschikbare dienstduren passen. Hierdoor ontstaat een gecombineerd routerings- en roostervraagstuk, dat in de literatuur bekendstaat als het Home Health Care Routing and Scheduling Problem (HHCRSP) [3].

Hoewel weefseluitnames verschillen van de thuiszorgcontext waarin de HHCRSP modellen oorspronkelijk zijn ontwikkeld, heeft het onderliggende probleem grote overeenkomsten. Ook bij WUON reizen gespecialiseerde teams naar verschillende locaties, beschikken teams over verschillende bevoegdheden en moeten werkzaamheden binnen vastgestelde tijdsvensters en maximale dienstduren worden uitgevoerd. De planning van weefseluitnameteams kan daardoor worden beschouwd als een specifieke vorm van een routerings- en roosterprobleem binnen de zorglogistiek. In elk van de drie onderzochte scenario's zijn er teams die routes rijden, dus de vergelijking met HHCRSP modellen is relevant ongeacht het gekozen scenario.

Euchi et al. [3] beschrijven ook drie verschillende doelfuncties waarmee geoptimaliseerd kan worden. De eerste betreft het minimaliseren van kosten van bijvoorbeeld personeel en vervoer. De andere twee gaan over patiënttevredenheid en werknemertevredenheid. De laatste twee zijn uiteraard meegenomen in de huidige werkwijze van WUON, maar worden in dit onderzoek niet geoptimaliseerd.

3.2 Vehicle Routing Problems en aanvullende beperkingen

Volgens Braekers et al. [1] is het Vehicle Routing Problem (VRP) één van de meest bestudeerde onderwerpen binnen de besliskunde. In de oorspronkelijke formulering moet een vloot voertuigen vanuit een depot een verzameling klanten bezoeken, waarbij de totale afgelegde afstand wordt geminimaliseerd. Sinds de introductie van het probleem door Dantzig en Ramser in 1959 [2] zijn vele uitbreidingen ontwikkeld. Braekers et al. [1] schrijven dat moderne VRP-varianten ook rekening houden met tijdsvensters, meerdere depots, capaciteitsbeperkingen, dynamische informatie en tijdsafhankelijke reistijden. Deze uitbreidingen leiden tot realistischere modellen. Omdat het VRP een NP-hard probleem is, zijn voor grotere praktijkproblemen vaak heuristieken nodig [1].

De literatuur onderscheidt verschillende VRP-uitbreidingen, die ook relevant zijn voor de planning van weefseluitnameteams. Een voorbeeld is het Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW), waarbij locaties alleen binnen bepaalde tijdsvensters bezocht mogen worden. Daarnaast bestaan er uitbreidingen met meerdere depots, meerdere ritten per voertuig en synchronisatiebeperkingen tussen verschillende activiteiten [1, 3].

Tabel 6 laat enkele overeenkomsten zien tussen VRP-kenmerken en de werkwijze van WUON.

VRP-kenmerk	Toepassing binnen WUON
Tijdsvensters	Maximale uitnametermijnen
Vaardigheden	Verschillende teamtypen
Meerdere depots	Oude Meer en Nijmegen
Meerdere ritten	Meerdere donoren per dienst
Synchronisatie	Donortransport en uitname
Werkduurbependingen	Maximale dienstduur

Tabel 6: Overeenkomst tussen veelvoorkomende VRP-beperkingen en het WUON-planningsprobleem.

3.3 Dynamische en stochastische planning

Naast de klassieke statische voertuigrouteringsproblemen zijn er ook dynamische routeringsproblemen. Pillac et al. [8] maken onderscheid tussen problemen waarbij alle informatie vooraf beschikbaar is, en problemen waarbij tijdens de uitvoering nieuwe informatie beschikbaar komt waardoor de route gewijzigd kan worden.

Dit onderscheid is ook relevant voor de planning van weefseluitnameteams. De MILP-modellen (gemengd-geheeltallige lineaire programmeringsmodellen) die in deze scriptie worden gebruikt beschouwen een situatie waarin alle donoren binnen de beschouwde periode vooraf bekend zijn. Hierdoor kan een optimale planning worden gemaakt op basis van volledige informatie. In de praktijk worden donoren echter gedurende de dag aangemeld. De simulatiemodellen met heuristieken benaderen de reële situatie door beslissingen te nemen op basis van de informatie die op dat moment beschikbaar is, zonder kennis van toekomstige donoren.

Naast de beschikbaarheid van informatie onderscheiden Pillac et al. [8] ook verschillen in de kwaliteit van de beschikbare informatie. In deterministische problemen wordt aangenomen dat alle relevante gegevens exact bekend zijn, terwijl in stochastische problemen bepaalde parameters

onzeker zijn en pas tijdens de uitvoering bekend worden. Voorbeelden hiervan zijn reistijden, behandelzeiten en de aankomst van nieuwe opdrachten [8].

Ook binnen het weefseluitnameproces is sprake van onzekerheid. Hoewel voor iedere donor een verwachte schouw- en uitnameduur kan worden geschat, kunnen deze tijden in de praktijk afwijken. Met name de duur van de schouw kan soms sterk toenemen wanneer er complicaties zijn. Daarnaast is vooraf niet bekend welke weefsels na schouw en bloedafname daadwerkelijk geschikt blijken voor uitname. Hierdoor wijkt de werkelijke duur van werkzaamheden soms af van de vooraf geplande duur.

In deze scriptie is gekozen voor een deterministische benadering. Voor de verschillende activiteiten zijn vaste tijdschattingen gebruikt, omdat onvoldoende historische gegevens beschikbaar waren om kansverdelingen voor de procedures te bepalen. Om deze reden zijn zowel de optimalisatiemodellen als de simulatiemodellen gebaseerd op deterministische tijdschattingen. De simulatie introduceert wel dynamiek in de aankomst van donoren, maar niet in de duur van de activiteiten zelf. De resultaten moeten daarom worden geïnterpreteerd als een analyse van de verwachte donorverwerkingsgraad en personeelsuren onder gemiddelde omstandigheden. Het meenemen van onzekerheid in reistijden, schouwtijden en uitnameduren is een interessante richting voor vervolgonderzoek.

3.4 Eerder onderzoek naar centralisatie van weefseluitname

Tijdens de Study Group Mathematics with Industry (SWI) 2026 werd een eerste verkennende analyse uitgevoerd naar mogelijke centralisatiescenario's voor de Nederlandse weefseluitnameketen [9]. In dit onderzoek werd de uitnameketen gemodelleerd als een wachtrijsysteem, waarbij donoren arriveren en uitnameteams fungeren als servers. De auteurs onderzochten zowel de huidige situatie als diverse vormen van gedeeltelijke en volledige centralisatie.

Op basis van dezelfde historische donorgegevens die ook in deze scriptie zijn gebruikt, werd vastgesteld dat de tijd tussen opeenvolgende donoraankomsten goed benaderd kon worden door een exponentiële verdeling. Hierdoor kon het donorproces worden gemodelleerd als een Poissonproces met een tijdsafhankelijke aankomstintensiteit. Daarnaast werden duidelijke dag- en seizoenseffecten waargenomen [9].

Een groot onderdeel van het SWI-onderzoek betrof het analyseren van reistijden onder verschillende centralisatiescenario's. Hierbij werden meerdere potentiële uitnamecentra onderzocht, gebaseerd op academische medische centra verspreid over Nederland. De analyse liet zien dat het gebruik van meerdere uitnamecentra de gemiddelde reisafstand aanzienlijk kan verkorten vergeleken met de huidige situatie van WUON. Wanneer ook de leveringen aan de weefselbanken werden meegenomen, bleken scenario's met ongeveer drie uitnamecentra een gunstige balans te bieden tussen landelijke dekking en minimale reistijden [9].

In een vroege fase van het huidige onderzoek is ook overwogen om scenario's met meerdere uitnamecentra te analyseren. Op basis van eerste analyses en overleg met de NTS werd echter geconcludeerd dat centralisatie van corneadonoren weinig toegevoegde waarde biedt, terwijl dit donortype juist het grootste deel van de donoren is. Wanneer alleen huid-, hartklep- en botdonoren worden gecentraliseerd, resteren gemiddeld slechts ongeveer 1,6 transportdonoren per dag in de onderzochte periode. Hierdoor werd verwacht dat het gebruik van meerdere uitnamecentra overbodig zou zijn. Om deze reden zijn scenario's met meerdere centrale uitnamelocaties buiten beschouwing gelaten en richt het huidige onderzoek zich uitsluitend op scenario's met één uitnamecentrum.

4 Methodologie

In dit hoofdstuk worden de methoden van het onderzoek beschreven. In Paragraaf 4.1 wordt eerst de berekening van de minimale kosten en het bijbehorende schema met behulp van gemengd-geheeltallige lineaire programmering (MILP) behandeld. Dit levert per scenario een ondergrens voor de kosten op, waarbij gebruik wordt gemaakt van alle beschikbare informatie, inclusief toekomstige gebeurtenissen. Voor realistisch haalbare kosten wordt vervolgens een simulatie gemaakt die online toewijzingsbeslissingen maakt zonder informatie over de toekomst. In Paragraaf 4.2 volgt een beschrijving van deze simulatie en de toegepaste heuristieken.

4.1 Gemengd-geheeltallige lineaire programmering

Om het effect van centralisatie te onderzoeken, wordt per scenario de maximale donorverwerkingsgraad bepaald, met daarbij het schema dat het aantal personeelsuren minimaliseert. Dit optimalisatieprobleem kan worden geformuleerd als een MILP-probleem. Hoewel MILP-problemen moeilijker op te lossen zijn dan standaard lineaire programmeringsproblemen, is deze aanpak nodig vanwege de aanwezigheid van binaire toewijzingsbeslissingen.

Als basismodel wordt het MILP-model van het decentrale scenario gebruikt. Voor de gedeeltelijk en volledig centrale scenario's is een tweede model ontwikkeld, omdat daarbij aanvullende taken, zoals het ophalen en terugbrengen van donoren, moeten worden ingepland. Dit model bevat daarom extra beslissingsvariabelen en voorwaarden. In de volgende paragrafen worden de verschillende componenten van de MILP-modellen besproken: de invoergegevens, parameters, beslissingsvariabelen, voorwaarden en doelfunctie. Vervolgens wordt beschreven hoe de modellen worden opgelost en hoe grotere tijdsvensters kunnen worden geanalyseerd. Tot slot wordt ingegaan op de complexiteit en rekentijden van de modellen.

4.1.1 Invoergegevens en parameters

In dit onderzoek wordt gebruikgemaakt van historische donordata als invoer voor de modellen, in plaats van gesimuleerde data. De Nederlandse Transplantatie Stichting (NTS) stelt voor iedere potentiële weefseldonor een rapport op, waardoor een dataset beschikbaar is met informatie over donoracceptatie, uitgenomen weefsels, locaties en tijdstippen. Op basis van deze gegevens worden de invoerparameters van de modellen gemaakt.

Per tijdsvenster worden de volgende verzamelingen gedefinieerd:

- I = verzameling geaccepteerde donoren met acceptatietijd in het gekozen tijdsvenster,
- K = verzameling teams,
- S = verzameling shifts.

Uit de donordata wordt voor iedere donor $i \in I$ de volgende informatie gebruikt als invoer voor de modellen:

- $\text{Arrival}[i]$ = tijdstip van acceptatie van donor i . Dit is het moment dat een potentiële donor is geaccepteerd na het gesprek met nabestaanden en het raadplegen van medische informatie. Dit kan een paar uur later zijn dan de circulatiestop. Vanaf dit moment kan een donor worden toegewezen aan een WUON team.

- $\text{Deadline}[i]$ = tijdstip waarop de uitname van donor i uiterlijk moet zijn begonnen. Ter vereenvoudiging wordt dit tijdstip bepaald als 24 uur na het moment van circulatiestop. Voor ongekoelde donoren geldt in de praktijk een kortere termijn, maar omdat deze categorie weinig voorkomt en hiervoor geen betrouwbare gegevens beschikbaar zijn, wordt dit onderscheid buiten beschouwing gelaten.
- $\text{Processing_time}[i]$ = de totale duur van de uitnameprocedures voor donor i . Deze waarde wordt bepaald op basis van de weefsels die volgens de donordata daadwerkelijk zijn uitgenomen. Zie ook Paragraaf 2.3.
- $\text{Donor_type}[i]$ = het hoogste type weefsel waarvoor donor i is geaccepteerd, waar $\text{cornea} = 1$, $\text{huid} = 2$, $\text{hartklep} = 3$, $\text{bot} = 4$.

Naast de donordata worden verschillende aanvullende parameters aan het model meegegeven. Allereerst is informatie over de beschikbare teams nodig. Voor ieder team en iedere shift worden de volgende parameters gedefinieerd:

- $\text{Team_type}[k]$ = hoogste type weefsel dat team k bevoegd is om uit te nemen. Zie ook Paragraaf 2.3.
- $\text{TeamSize}[k]$ = het aantal personen in team k waarmee een shift wordt gedaan.
- $\text{Shift_start}[k, s]$ = begintijd van de s -de shift van team k . Werk mag pas beginnen na die tijd.
- $\text{Shift_end}[k, s]$ = eindtijd van de s -de shift van team k . Werk moet afgerond zijn voor die tijd.
- $\text{MaxWork}[k]$ = het aantal uren dat team k maximaal mag werken binnen een shift.
- $\text{SetupCost}[k]$ = het aantal uren dat een team op de thuislocatie besteedt om de shift voor te bereiden.

Daarnaast worden parameters opgenomen die betrekking hebben op reistijden:

- $\text{Travel_ij}[i, j]$ = aantal uur reistijd over de weg tussen donoren i en j ,
- $\text{Travel_base}[i, k]$ = aantal uur reistijd over de weg tussen donor i en de thuislocatie van team k .

Met thuislocatie wordt de postcode bedoeld waar een team zijn dienst begint en beëindigt. Zes van de zeven huidige WUON-teams starten en eindigen hun dienst op de WUON-locatie in Oude Meer. Het zevende team begint de dienst op een locatie in de omgeving van Nijmegen en beëindigt deze bij het Radboud UMC. Ter vereenvoudiging wordt hiervoor één postcode als thuislocatie gehanteerd.

Ten slotte zijn er een aantal constante parameters:

- $\text{Penalty_wait} = 0.001$. Dit is een kleine boete per uur voor de uren tussen circulatiestop en het begin van de uitname. Dit wordt aan de doelfunctie toegevoegd om te stimuleren dat uitnames liever vroeger dan later gebeuren, wat de voorkeur heeft vanwege de kwaliteit van de weefsels. Deze boete is klein genoeg om nooit extra donoruitlet te veroorzaken.

- Fixed_time = 0.5. Dit is de door de NTS en WUON geschatte tijd (in uren) van de voorbereiding van een uitname, waarin de schouw en bloedafname worden verricht. Zie ook Paragraaf 2.3.
- $M = 100$. Deze parameter wordt gebruikt om sommige voorwaarden lineair te maken.

4.1.2 Beslissingsvariabelen

De modellen bevatten verschillende beslissingsvariabelen waarvan de waarden door de solver worden bepaald om de doelfunctie te minimaliseren. Hiermee worden dus de beslissingen over het toewijzingsschema gemaakt. Het betreft de volgende beslissingsvariabelen:

- $x[i, k, s] = \begin{cases} 1, & \text{als donor } i \text{ door team } k \text{ in shift } s \text{ wordt behandeld} \\ 0, & \text{anders} \end{cases}$
- $y[i, j, k, s] = \begin{cases} 1, & \text{als donor } i \text{ de directe voorganger is van donor } j \text{ in shift } s \text{ van team } k \\ 0, & \text{anders} \end{cases}$
- $\text{first}[i, k, s] = \begin{cases} 1, & \text{als donor } i \text{ door team } k \text{ als eerste taak in shift } s \text{ wordt uitgenomen} \\ 0, & \text{anders} \end{cases}$
- $u[i] = \begin{cases} 1, & \text{als donor } i \text{ niet wordt behandeld} \\ 0, & \text{anders} \end{cases}$
- $\text{start}[i, k, s] = \begin{cases} \text{Arrival}[i], & \text{als donor } i \text{ niet door team } k \text{ in shift } s \text{ wordt behandeld} \\ \text{tijdstip dat aan donor } i \text{ door team } k \text{ in shift } s \text{ wordt begonnen,} & \text{anders} \end{cases}$
Dit is het tijdstip waarop een team aan de eerste taak begint voor een donor, wat meestal de reis is naar de donorlocatie. De reden om de starttijd op de aankomsttijd te forceren in niet-gebruikte shifts, is vanwege de wachtpenalty in de doelfunctie.
- $\text{finish}[i, k, s] = \begin{cases} \text{tijdstip van afronding,} & \text{als taken van donor } i \text{ door team } k \text{ in shift } s \text{ worden afgerond} \\ \text{ongedefinieerd,} & \text{als donor } i \text{ niet door team } k \text{ in shift } s \text{ wordt behandeld} \end{cases}$
Afronden wil hier zeggen dat de laatste taak van een donor is afgerond, wat meestal de uitname is. Reistijd na het bezoek wordt hierin niet meegenomen.
- $\text{TeamShiftUsed}[k, s] = \begin{cases} 1, & \text{als shift } s \text{ van team } k \text{ gebruikt wordt} \\ 0, & \text{anders} \end{cases}$
- $\text{StartFirstTask}[k, s] = \begin{cases} \text{Shift_start}[k, s], & \text{als shift } s \text{ niet door team } k \text{ wordt gebruikt} \\ \text{tijdstip dat team } k \text{ in shift } s \text{ met de eerste donortaat start,} & \text{anders} \end{cases}$
ShiftFirstTask is de start van de eerste donortaat, dus exclusief opstarttijd van de shift. EndLastTask hieronder is het moment dat een team helemaal klaar is met werken, inclusief terugreis naar de thuisbasis.

- $\text{EndLastTask}[k, s] = \begin{cases} \text{Shift_start}[k, s], & \text{als shift } s \text{ niet door team } k \text{ wordt gebruikt} \\ \text{tijdstip dat team } k \text{ in shift } s \text{ met de laatste taak klaar is, anders} \end{cases}$

Voor ongebruikte shifts is het belangrijk dat StartFirstTask en EndLastTask op dezelfde waarde worden geforceerd, vanwege de tweede term van de doelfunctie van de tweede fase. Zonder dit te forceren zal deze term een grote negatieve waarde aannemen bij het minimaliseren.

4.1.3 Voorwaarden

Het model bevat een groot aantal lineaire voorwaarden die gezamenlijk zorgen dat een geldig toewijzingsschema wordt gemaakt. Om het overzicht te behouden worden de voorwaarden onderverdeeld in categorieën op basis van hun functie binnen het model. Deze categorieën worden hieronder afzonderlijk besproken. Waardes van bijvoorbeeld gebruikte en ongebruikte shifts hebben vaak voor ieder geval een andere categorie, wat soms redundante voorwaarden geeft. Dit is vanwege de begrijpbaarheid van het model niet verder ingekort.

Maximale werktijd

De tijd tussen het begin en het eind van de gewerkte shift door team k mag niet groter zijn dan $\text{MaxWork}[k]$:

$$\text{SetupCost}[k] + \text{EndLastTask}[k, s] - \text{StartFirstTask}[k, s] \leq \text{MaxWork}[k], \quad \forall k \in K, s \in S.$$

Donor maximaal één keer behandelen

Een donor wordt óf precies één keer behandeld, óf blijft onbehandeld:

$$\sum_{k \in K, s \in S} x[i, k, s] = 1 - u[i], \quad \forall i \in I.$$

Gebruikte shift

Een shift wordt gemarkeerd als gebruikt als daarin minstens één donor wordt behandeld:

$$x[i, k, s] \leq \text{TeamShiftUsed}[k, s], \quad \forall i \in I, k \in K, s \in S.$$

Eerste taak van een shift

De start van de behandeling van een donor in een shift vindt niet plaats voor de start van de eerste taak van de shift, als deze shift wordt gebruikt. De term met M zorgt ervoor dat deze voorwaarde alleen geldt als een donor in de gegeven shift wordt behandeld:

$$\text{start}[i, k, s] \geq \text{StartFirstTask}[k, s] - M(1 - x[i, k, s]), \quad \forall i \in I, k \in K, s \in S.$$

De start van de eerste taak in een shift vindt niet plaats voor het begin van de shift plus de opstarttijd, als de shift wordt gebruikt:

$$\text{StartFirstTask}[k, s] \geq (\text{Shift_start}[k, s] + \text{SetupCost}[k]) \cdot \text{TeamShiftUsed}[k, s], \quad \forall k \in K, s \in S.$$

Er is maar één donor de eerste van een gebruikte shift:

$$\sum_{i \in I} \text{first}[i, k, s] = \text{TeamShiftUsed}[k, s], \quad \forall k \in K, s \in S.$$

Eind van een shift

Het eind van de laatste taak vindt niet plaats voor het eind van de laatst behandelde donor plus de terugreistijd:

$$\text{EndLastTask}[k, s] \geq \text{finish}[i, k, s] + \text{Travel_base}[i, k] - M(1 - x[i, k, s]), \quad \forall i \in I, k \in K, s \in S.$$

Het eind van de laatste taak mag niet plaatsvinden na het eind van de shift:

$$\text{EndLastTask}[k, s] \leq \text{Shift_end}[k, s] + M(1 - \text{TeamShiftUsed}[k, s]), \quad \forall k \in K, s \in S.$$

Team type compatibiliteit

Een donor kan alleen worden behandeld door een team van minstens hetzelfde type. Daarom worden incompatibele combinaties uitgesloten:

$$x[i, k, s] = 0, \quad \forall i \in I, k \in K, s \in S \text{ waarvoor } \text{TeamType}[k] < \text{DonorType}[i].$$

Aankomst

De start van de behandeling van een donor mag niet plaatsvinden voor de aankomst van die donor:

$$\text{start}[i, k, s] \geq \text{Arrival}[i] - M(1 - x[i, k, s]), \quad \forall i \in I, k \in K, s \in S.$$

Deadline

Het begin van de uitname (i.e. donor starttijd plus reistijd plus voorbereidingstijd) mag niet plaatsvinden na de deadline van de weefseluitname van de donor:

$$\begin{aligned} & \text{start}[i, k, s] + \text{Travel_base}[i, k] \cdot \text{first}[i, k, s] + \sum_{j \in I, j \neq i} \text{Travel_ij}[j, i] \cdot y[j, i, k, s] + \text{Fixed_time} \\ & \leq \text{Deadline}[i] + M(1 - x[i, k, s]), \quad \forall i \in I, k \in K, s \in S. \end{aligned}$$

Geldige volgorde

Als donor j de opvolger van donor i is in een shift, dan wordt niet aan j begonnen voordat i klaar is:

$$\text{start}[j, k, s] \geq \text{finish}[i, k, s] - M(1 - y[i, j, k, s]), \quad \forall i, j \in I \text{ met } i \neq j, k \in K, s \in S.$$

Een donor heeft of één voorganger, of is de eerste van een shift:

$$\text{first}[i, k, s] + \sum_{j \in I, j \neq i} y[j, i, k, s] = x[i, k, s], \quad \forall i \in I, k \in K, s \in S.$$

Donoren kunnen alleen elkaars voorganger of opvolger zijn als ze in dezelfde shift worden behandeld:

$$y[i, j, k, s] \leq x[i, k, s], \quad \forall i, j \in I \text{ met } i \neq j, k \in K, s \in S,$$

$$y[i, j, k, s] \leq x[j, k, s], \quad \forall i, j \in I \text{ met } i \neq j, k \in K, s \in S.$$

Een donor is nooit de voorganger van zichzelf:

$$y[i, i, k, s] = 0, \quad \forall i \in I, k \in K, s \in S.$$

Twee donoren kunnen niet elkaars voorganger zijn, wat ook bij de variabele y moet worden geforceerd:

$$y[i, j, k, s] + y[j, i, k, s] \leq 1, \quad \forall i, j \in I \text{ met } i \neq j, k \in K, s \in S.$$

Een donor heeft maximaal één opvolger:

$$\sum_{j \in I, j \neq i} y[i, j, k, s] \leq 1, \quad \forall i \in I, k \in K, s \in S.$$

Shift structuur

Het tijdstip van de afronding van een behandelde donor wordt bepaald door de starttijd van de betreffende taak, plus de benodigde reistijd, eventuele voorbereidingstijd en de duur van de uitname. Omdat dit alleen relevant is wanneer een donor daadwerkelijk aan een team en shift is toegewezen, wordt deze gemodelleerd met behulp van een boven- en ondergrens. Hierdoor wordt de voorwaarde alleen actief wanneer de bijbehorende toewijzingsvariabele de waarde 1 aanneemt. De tweede is redundant gegeven de andere voorwaarden en de doelfunctie.

$$\begin{aligned} \text{finish}[i, k, s] &\geq \text{start}[i, k, s] + \text{Travel_base}[i, k] \cdot \text{first}[i, k, s] \\ &\quad + \sum_{j \in I, j \neq i} \text{Travel_ij}[j, i] \cdot y[j, i, k, s] + \text{Fixed_time} \\ &\quad + \text{Processing_time}[i] - M(1 - x[i, k, s]), \quad \forall i \in I, k \in K, s \in S, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{finish}[i, k, s] &\leq \text{start}[i, k, s] + \text{Travel_base}[i, k] \cdot \text{first}[i, k, s] \\ &\quad + \sum_{j \in I, j \neq i} \text{Travel_ij}[j, i] \cdot y[j, i, k, s] + \text{Fixed_time} \\ &\quad + \text{Processing_time}[i] + M(1 - x[i, k, s]), \quad \forall i \in I, k \in K, s \in S. \end{aligned}$$

Omdat een gebruikte shift minstens één donor bevat en de enige vaststaande tijd van een donor de voorbereidingstijd van de uitname is, geldt dat het eind van de laatste taak minstens het begin van de eerste taak plus de betreffende voorbereidingstijd is. Deze voorwaarde is redundant voor het MILP model, maar toch behouden voor een mogelijk strakkere LP-relaxatie, wat de solver mogelijk sneller maakt:

$$\text{EndLastTask}[k, s] \geq \text{StartFirstTask}[k, s] + \text{Fixed_time} - M(1 - \text{TeamShiftUsed}[k, s]), \quad \forall k \in K, s \in S.$$

Als een shift niet wordt gebruikt moeten StartFirstTask en EndLastTask beide gelijk zijn aan de begintijd van de shift, omdat op basis hiervan de personeelsuren berekend worden:

$$\begin{aligned} \text{StartFirstTask}[k, s] &\leq \text{Shift_start}[k, s] + M \cdot \text{TeamShiftUsed}[k, s], \quad \forall k \in K, s \in S, \\ \text{StartFirstTask}[k, s] &\geq \text{Shift_start}[k, s] - M \cdot \text{TeamShiftUsed}[k, s], \quad \forall k \in K, s \in S, \\ \text{EndLastTask}[k, s] &\leq \text{Shift_start}[k, s] + M \cdot \text{TeamShiftUsed}[k, s], \quad \forall k \in K, s \in S, \\ \text{EndLastTask}[k, s] &\geq \text{Shift_start}[k, s] - M \cdot \text{TeamShiftUsed}[k, s], \quad \forall k \in K, s \in S. \end{aligned}$$

Starttijd als niet toegewezen

Als een donor niet is toegewezen aan een shift, wordt de starttijd van zijn behandeling in die shift op de aankomsttijd gezet:

$$\text{start}[i, k, s] \geq \text{Arrival}[i] - M \cdot x[i, k, s], \quad \forall i \in I, k \in K, s \in S,$$

$$\text{start}[i, k, s] \leq \text{Arrival}[i] + M \cdot x[i, k, s], \quad \forall i \in I, k \in K, s \in S.$$

Donor tijdsvenster begrenzen

De volgende voorwaarden zijn overbodig voor het MILP model, maar worden behouden omdat ze de LP-relaxatie mogelijk verstrakken. In plaats de grenzen van via een keten van bestaande voorwaarden af te leiden, worden ze hier direct geformuleerd.

Een behandeling van een donor wordt in een shift niet gestart voor de starttijd van de shift of de donoraankomst:

$$\text{start}[i, k, s] \geq \max(\text{Arrival}[i], \text{Shift_start}[k, s] + \text{SetupCost}[k]) - M(1 - x[i, k, s]), \quad \forall i \in I, k \in K, s \in S.$$

De starttijd van de behandeling van een donor is voor de deadline van die donor:

$$\text{start}[i, k, s] \leq \text{Deadline}[i] + M(1 - x[i, k, s]), \quad \forall i \in I, k \in K, s \in S.$$

De eindtijd van de behandeling van een donor is minstens de starttijd plus de voorbereidingstijd (Fixed_time):

$$\text{finish}[i, k, s] \geq \text{start}[i, k, s] + \text{Fixed_time} - M(1 - x[i, k, s]), \quad \forall i \in I, k \in K, s \in S.$$

De starttijd van een opvolger is minstens de starttijd van de voorganger plus de voorbereidingstijd (de minimale reeks):

$$\text{start}[j, k, s] \geq \text{start}[i, k, s] + \text{Fixed_time} - M(1 - y[i, j, k, s]), \quad \forall i, j \in I \text{ met } i \neq j, k \in K, s \in S.$$

De formuleringen zijn geïmplementeerd in Python met behulp van Pyomo.

4.1.4 Doelfunctie

Het doel van de optimalisatie is het construeren van een toewijzingsschema met minimale kosten, onder de voorwaarde dat zoveel mogelijk donoren worden behandeld. Om deze prioritering expliciet af te dwingen, wordt gebruikgemaakt van een tweefasenoptimalisatie, met twee afzonderlijke doelfuncties. De eerste doelfunctie is om het aantal gemiste donoren te minimaliseren:

$$u^* := \min \sum_{i \in I} u[i].$$

Dit wordt in de eerste fase opgelost. Op basis van u^* wordt er nog een extra voorwaarde aan het model toegevoegd, om te zorgen dat in de tweede fase de minimale kosten worden berekend voor het maximale aantal behandelde donoren:

$$\sum_{i \in I} u[i] = u^*.$$

De doelfunctie van de tweede fase bestaat voor een groot deel uit personeelsuren, namelijk de personeelsuren voor de set-ups van de shifts, en de personeelsuren tussen het begin en het eind van de donortaken in een shift. Daarnaast is er een kleine wachtboete die vroeg beginnen stimuleert. Deze wordt vermenigvuldigd met de tijd tussen de aankomst en de start van de uitname, voor iedere donor. De tweede doelfunctie is dus als volgt:

$$\begin{aligned}
\min \quad & \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \text{TeamShiftUsed}[k, s] \cdot \text{SetupCost}[k] \cdot \text{TeamSize}[k] \\
& + \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} (\text{EndLastTask}[k, s] - \text{StartFirstTask}[k, s]) \cdot \text{TeamSize}[k] \\
& + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \text{Penalty_wait} \cdot \left(\text{start}[i, k, s] + \text{Travel_base}[i, k] \cdot \text{first}[i, k, s] \right. \\
& \quad \left. + \sum_{j \in I, j \neq i} \text{Travel_ij}[j, i] \cdot y[j, i, k, s] - \text{Arrival}[i] \right).
\end{aligned}$$

4.1.5 Modelversterkende voorwaarden

In een optimale oplossing zijn bepaalde patronen te herkennen. De kosten bestaan voornamelijk uit de personeelsuren, die naast de set-up uren worden berekend als de tijd tussen de start van de eerste taak (StartFirstTask) en het eind van de laatste taak (EndLastTask) in een shift. Hierdoor zal het model er altijd voor kiezen om een donor direct na een andere donor te laten volgen zodat de teams niet onnodig wachten, tenzij dat door de aankomsttijd niet mogelijk is. Daarnaast leidt de aanwezigheid van een kleine wachttijdboete ertoe dat taken zo vroeg mogelijk worden gedaan binnen de beschikbare shift. Reeksen taken starten daardoor bij voorkeur direct aan het begin van een dienst, tenzij een donor vanwege zijn aankomsttijd pas later beschikbaar is.

Stelling 1. *Als er in een optimale oplossing in een gebruikte shift geen donor is aan wiens behandeling wordt begonnen op zijn aankomst, dan begint het team precies op het begin van de shift.*

Bewijs. We bewijzen dit uit het ongerijmde. Stel dat er in een optimale oplossing in een shift geen donor is aan wiens behandeling wordt begonnen op zijn aankomst, en het team start niet precies op het begin van de shift. Dan bestaat er een tijdsduur $t > 0$ zodanig dat het vervroegen van alle behandelingen in de shift met t ook een geldige oplossing oplevert. Deze nieuwe oplossing heeft lagere kosten vanwege de wachtboete. Dit is in tegenspraak met de optimaliteit van de oorspronkelijke oplossing. $\square$

Stelling 2. *Als er in een optimale oplossing niet aan de behandeling van een donor wordt begonnen op zijn aankomst, dan wordt zijn behandeling precies gestart op het tijdstip dat de vorige taak (donor of set-up) was beëindigd.*

Bewijs. We bewijzen dit uit het ongerijmde. Stel dat in een optimale oplossing een behandeling van een donor niet wordt gestart op zijn aankomst, en ook niet op het moment van beëindigen van de vorige taak. Dan bestaat er een tijdsduur $t > 0$ zodanig dat de behandeling van de donor met t vervroegen ook een oplossing is, en die oplossing heeft lagere kosten vanwege de wachtboete. Dus de originele oplossing was niet optimaal, wat een tegenspraak is. $\square$

Op basis van deze stellingen kunnen aanvullende voorwaarden aan het model worden toegevoegd. Hierdoor wordt een deel van de structuur van optimale oplossingen vooraf vastgelegd, waardoor de solver binnen een kleinere oplossingsruimte naar een optimale oplossing kan zoeken.

Voor de implementatie hiervan worden twee extra hulpvariabelen geïntroduceerd. Zij zullen de modus aangeven: óf aan een shift wordt begonnen op Shift_start (modus ‘a’), óf dat er in die shift een donor is die precies op zijn aankomsttijd wordt gestart, ofwel aankomst-kritisch is (modus ‘b’), maar niet beide. Hoewel er een heel kleine kans is dat beide modi tegelijk gelden, is dat ter vereenvoudiging van het model niet meegenomen. Het verandert namelijk niets aan de oplossing.

- $a[k, s] = \begin{cases} 1, & \text{als shift } s \text{ van team } k \text{ op Shift_start}[k, s] \text{ wordt gestart} \\ 0, & \text{anders} \end{cases}$
- $b[i, k, s] = \begin{cases} 1, & \text{als donor } i \text{ in shift } s \text{ door team } k \text{ op Arrival}[i] \text{ wordt gestart} \\ 0, & \text{anders} \end{cases}$

Met behulp van deze extra beslissingsvariabelen kunnen vervolgens voorwaarden worden toegevoegd die de hierboven beschreven patronen expliciet afdwingen.

Selecteer modus

Een donor kan alleen aankomst-kritisch zijn als die werkelijk in de shift wordt behandeld:

$$b[i, k, s] \leq x[i, k, s], \quad \forall i \in I, k \in K, s \in S.$$

In een gebruikte shift geldt óf modus ‘a’, óf er is minstens één aankomst-kritische donor, maar niet beide:

$$a[k, s] + b[i, k, s] \leq \text{TeamShiftUsed}[k, s], \quad \forall i \in I, k \in K, s \in S.$$

Er moet een modus ‘a’ of ‘b’ gelden in een gebruikte shift:

$$a[k, s] + \sum_{i \in I} b[i, k, s] \geq \text{TeamShiftUsed}[k, s], \quad \forall k \in K, s \in S.$$

Modus ‘a’: begin op Shift_start

Als modus ‘a’ geldt, dan begint de eerste taak precies op het begin van de shifttijd plus de set-up tijd. De eerste volgt al uit een eerdere voorwaarde:

$$\text{StartFirstTask}[k, s] \geq \text{Shift_start}[k, s] + \text{SetupCost}[k] - M(1 - a[k, s]), \quad \forall k \in K, s \in S,$$

$$\text{StartFirstTask}[k, s] \leq \text{Shift_start}[k, s] + \text{SetupCost}[k] + M(1 - a[k, s]), \quad \forall k \in K, s \in S.$$

Modus ‘b’: aankomst-kritische donor

Als een donor aankomst-kritisch is, dan is de start van de donor gelijk aan de aankomst. De eerste volgt al uit een eerdere voorwaarde:

$$\text{start}[i, k, s] \geq \text{Arrival}[i] - M(1 - b[i, k, s]), \quad \forall i \in I, k \in K, s \in S,$$

$$\text{start}[i, k, s] \leq \text{Arrival}[i] + M(1 - b[i, k, s]), \quad \forall i \in I, k \in K, s \in S.$$

De starttijd van een opvolger is altijd gelijk aan de eindtijd van de voorganger, tenzij de opvolger aankomst-kritisch is. Ook deze eerste volgt al uit een eerdere voorwaarde:

$$\text{start}[j, k, s] \geq \text{finish}[i, k, s] - M(b[j, k, s] + (1 - y[i, j, k, s])), \quad \forall i, j \in I \text{ met } i \neq j, k \in K, s \in S,$$

$$\text{start}[j, k, s] \leq \text{finish}[i, k, s] + M(b[j, k, s] + (1 - y[i, j, k, s])), \quad \forall i, j \in I \text{ met } i \neq j, k \in K, s \in S.$$

4.1.6 Centralisatiemodel

Deze paragraaf beschrijft de modellen voor de gedeeltelijk centrale en volledig centrale scenario's. Beide zijn gebaseerd op één centralisatiemodel, met een kleine aanpassing die ervoor zorgt dat de teams de juiste soort taken uitvoeren.

In het decentrale model reist een uitnameteam naar de donorlocatie, waarna de voorbereiding en de uitname op dezelfde locatie plaatsvinden. In het centralisatiemodel worden deze activiteiten gescheiden. De donor wordt naar een centraal uitnamecentrum vervoerd, waar de uitname plaatsvindt. Hierdoor ontstaan extra activiteiten die in het model moeten worden meegenomen.

Afhankelijk van het type donor kunnen de taken bestaan uit een schouw, transport naar het uitnamecentrum ('heen'), de uitname en transport terug naar de donorlocatie ('terug'). Voor corneadonoren wordt slechts één gecombineerde taak gemodelleerd, omdat opsplitsen daar geen nut heeft.

Door de splitsing van taken verandert de structuur van het optimalisatieprobleem. De verzamelingen donoren I worden uitgebreid met een verzameling taken T . Toewijzingsvariabelen, routevariabelen ($y[]$) en tijdsvariabelen worden niet meer per donor maar per taak gedefinieerd. Hierdoor kan het model bepalen welke teams welke afzonderlijke taken uitvoeren en in welke volgorde deze plaatsvinden.

Daarnaast worden extra voorwaarden toegevoegd om de juiste volgorde tussen taken van dezelfde donor af te dwingen. Een schouw moet plaatsvinden vóór transport naar het uitnamecentrum, transport naar het uitnamecentrum vóór de uitname en de uitname vóór het retourtransport. Van donoren voor wie een uitname wordt uitgevoerd, moeten alle bijbehorende taken worden ingepland.

Het gedeeltelijk centrale model gaat ervan uit dat de corneateams zowel transporttaken als cornea-uitnames uitvoeren. In het volledig centrale model worden hiervoor afzonderlijke transportteams toegevoegd. Deze transportteams mogen uitsluitend schouw- en transporttaken uitvoeren, terwijl uitnameteams alleen uitnametaken mogen uitvoeren.

De tweefasenoptimalisatie blijft gelijk aan die van het decentrale model. In de eerste fase wordt het aantal niet-verwerkte donoren geminimaliseerd. In de tweede fase wordt dit aantal vast genomen en worden de personeelsinzet, de duur van gebruikte diensten en de wachttijden van donoren geminimaliseerd.

4.1.7 Implementatie

Deze paragraaf geeft een beschrijving van de implementatie. Het model is ontwikkeld in Python met behulp van de Pyomo-bibliotheek. Het model wordt opgebouwd als een `ConcreteModel`, waarna de verzamelingen, parameters, beslissingsvariabelen, voorwaarden en doelfuncties worden toegevoegd. Voor het oplossen van de MILP-modellen is gebruikgemaakt van de solver Gurobi. In vergelijking met verschillende geteste open-source solvers bleek Gurobi aanzienlijk betere prestaties te leveren voor de beschouwde probleemgroottes.

De MIPGap is ingesteld op 0. Hierdoor zoekt Gurobi naar een bewezen optimale oplossing. Wanneer de ingestelde tijdslimiet wordt bereikt voordat optimaliteit kan worden bewezen, wordt de beste tot dan toe gevonden oplossing gebruikt.

Voor kleine probleeminstanties worden optimale oplossingen doorgaans binnen enkele seconden gevonden. Voor dagen met grotere aantallen donoren neemt de rekentijd echter sterk toe. Om de benodigde rekentijd beheersbaar te houden is daarom een tijdslimiet van 180 seconden per optimalisatiefase ingesteld.

Om de invloed van deze tijdslimiet te beoordelen zijn voor verschillende representatieve probleeminstanties van het decentrale model de convergentiecurves van Gurobi geanalyseerd. Figuur 1 toont de ontwikkeling van zowel de beste gevonden oplossing als de bijbehorende ondergrens gedurende het oplossingsproces. Hieruit blijkt dat het grootste deel van de verbetering in de doelfunctiewaarde plaatsvindt gedurende de eerste minuten van het zoekproces. Na ongeveer 180 seconden worden doorgaans nog slechts beperkte verbeteringen gevonden, terwijl de benodigde extra rekentijd sterk toeneemt zonder tijdslimiet.

De gekozen tijdslimiet vormt hierdoor een praktisch compromis tussen oplossingskwaliteit en rekentijd. Hoewel de optimaliteit van oplossingen binnen de tijdslimiet niet altijd kan worden bewezen, blijkt het kwaliteitsverlies beperkt ten opzichte van aanzienlijk langere reketijden.

De in Figuur 1 weergegeven probleeminstanties bevatten tussen de 10 en 16 donoren per run. Deze grootteklasse is representatief voor het grootste deel van de dataset: van de 731 onderzochte dagen bevatten er 711 (97,3%) maximaal 16 donoren. Hierdoor geven de weergegeven convergentiecurves een realistisch beeld van de prestaties van de solver voor de meeste onderzochte dagen.

Vanwege de lange rekentijd van de modellen was het in dit onderzoek niet mogelijk om lange tijdsvensters van donoraankomsten in één keer te optimaliseren. Hierdoor is ervoor gekozen om de experimenten uit te voeren per tijdsvenster van 24 uur, waarbij iedere run geheel onafhankelijk is van de andere runs. Dit is een groot nadeel, omdat een realistische optimale planning van iedere dag afhangt van zowel de dag ervoor als de dag erna. Hoewel deze methode het mogelijk maakt om de verschillende modellen met elkaar te vergelijken, levert het niet een geldig schema door alle tijdsvensters achter elkaar te plakken. Het kan namelijk voorkomen dat in een run van een bepaalde dag ook taken in een shift van de dag erna worden gepland, bijvoorbeeld als een donor pas in de avond aankomt. De onafhankelijke run van de dag erna neemt dat niet mee in de berekening.

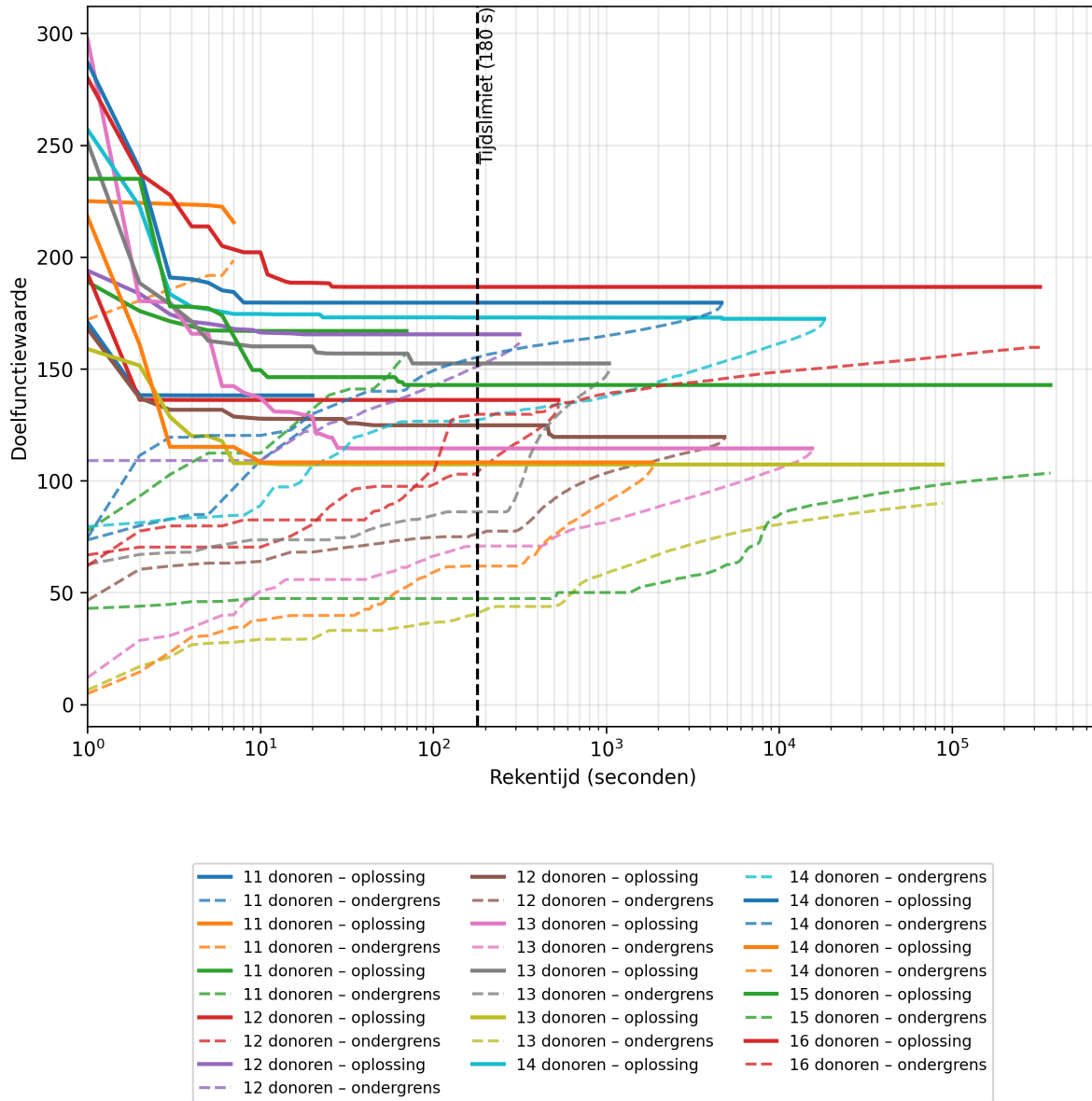
Bij het bestuderen van de gegenereerde optimale schema's per dag van donoraankomsten viel echter op dat dit probleem in de praktijk beperkt is. Over het algemeen worden de vroegste shifts op de dag van de donoraankomsten in het tijdsvenster niet of slechts gedeeltelijk benut. Er zijn gemiddeld immers minder donoraankomsten in de nacht [9]. Behalve bij opeenvolgende dagen met bovengemiddeld veel donoraankomsten, zijn optimale schema's van verschillende tijdsvensters redelijk goed te combineren. Deze methode is dus een benadering van één volledige optimalisatierun van de hele onderzochte periode (2024-2025).

Een meer gedetailleerde uitleg over de beperkingen van deze methode, en een mogelijke verbetering, worden in de volgende paragraaf besproken.

4.1.8 Uitbreidend tijdsvenster iteratief model

Zoals in de vorige paragraaf besproken, worden de optimalisatiemodellen in deze scriptie toegepast op beperkte tijdsvensters van één dag. Hierdoor wordt slechts beperkt rekening gehouden met de invloed van toekomstige donoren. In de praktijk kunnen er afhankelijkheden tussen opeenvolgende dagen ontstaan, bijvoorbeeld wanneer een donor die laat op dag t arriveert, pas na middernacht wordt behandeld en daardoor capaciteit inneemt op dag $t + 1$.

Om dergelijke effecten beter te modelleren is een iteratieve methode onderzocht waarbij het optimalisatievenster stapsgewijs wordt vergroot. Na iedere optimalisatieronde worden vroege beslissingen vastgezet, waarna een groter tijdsvenster opnieuw wordt geoptimaliseerd. De ondergrens van het tijdsvenster blijft hierbij gelijk, maar de bovengrens stijgt in elke iteratie. Deze aanpak kan



Figuur 1: Ontwikkeling van de beste gevonden oplossing (doorgetrokken lijnen) en de bijbehorende ondergrens (gestreepte lijnen) gedurende het oplossingsproces van Gurobi voor enkele representatieve probleeminstanties. De verticale stippellijn geeft de gekozen tijdslimiet van 180 seconden weer. Het grootste deel van de verbetering in de doelfunctiewaarde vindt plaats vóór deze tijdslimiet.

informatie van de volgende dag meenemen zonder direct een model voor de twee dagen samen op te lossen, wat een veel langere rekentijd nodig zou hebben.

Deze methode is echter ook een benadering en garandeert daardoor geen optimale oplossing voor de volledige periode. Bovendien bleek het geheugengebruik sterk toe te nemen, omdat voor grote tijdsvensters alle donoren, reistijden en beslissingsvariabelen gelijktijdig in het model aanwezig moeten zijn. Op de beschikbare hardware bleek deze aanpak daardoor niet praktisch uitvoerbaar voor de experimenten in deze scriptie.

Om deze reden is de methode niet verder toegepast. Het onderzoeken van iteratieve tijdsvensters blijft echter interessant voor vervolgonderzoek, omdat hiermee mogelijk betere planningen kunnen worden gevonden door rekening te houden met donoraankomsten over meerdere opeenvolgende dagen.

4.1.9 Complexiteit

MILP-problemen zijn NP-hard, wat betekent dat er geen bekend algoritme is dat ze in polynomiale tijd in de inputgrootte oplost. In de praktijk kan de rekentijd daardoor snel oplopen naarmate de probleemomvang toeneemt. De rest van deze paragraaf bespreekt daarom hoe de omvang van het model, en met name het aantal binaire variabelen, toeneemt met de probleemgrootte.

De grootte van het MILP-model wordt voornamelijk bepaald door het aantal donoren $\bar{I} = |I|$, het aantal teams $\bar{K} = |K|$ en het aantal shifts $\bar{S} = |S|$. In het decentrale model zijn de meeste variabelen lineair in deze grootheden. De routevariabelen y_{ijks} vormen echter een uitzondering. Voor iedere mogelijke combinatie van twee donoren, een team en een shift wordt een binaire variabele toegevoegd. Hierdoor is het aantal routevariabelen van de orde $O(\bar{I}^2 \bar{K} \bar{S})$.

Deze kwadratische groei heeft een grote invloed op de rekentijd. Een beperkte toename van het aantal donoren leidt tot een grote toename van het aantal binaire variabelen en mogelijke oplossingen.

In het centralisatiemodel wordt iedere donorbehandeling opgedeeld in meerdere taken. In de praktijk kan de behandeling van één donor bestaan uit een schouw, transport naar het uitnamecentrum, een uitname en retourtransport. Hierdoor kan het aantal taken een veelvoud zijn van het aantal donoren. Laat $\bar{T}$ het totale aantal donortaken voorstellen. De routevariabelen worden dan gedefinieerd tussen taken in plaats van tussen donoren, waardoor het aantal potentiële koppelingen groeit volgens orde $O(\bar{T}^2 \bar{K} \bar{S})$. Omdat in het volledig centrale model voor de meeste donoren meerdere taken moeten worden ingepland, geldt daar in de praktijk vaak $\bar{T} > \bar{I}$. Het volledig centrale model bevat daardoor aanzienlijk meer binaire variabelen dan het decentrale model, wat leidt tot langere oplostijden. Bij het gedeeltelijk centrale model is dat verschil kleiner.

Hoewel de presolve-fase van Gurobi een groot aantal variabelen en voorwaarden kan elimineren, blijft de combinatie van routevariabelen en geheeltallige beslissingen een belangrijke oorzaak van de toenemende rekentijden bij grotere probleeminstanties.

4.2 Simulatie met heuristieken

Hoewel de MILP-modellen een ondergrens geven voor de benodigde personeelsinzet, gebruiken zij volledige kennis van alle toekomstige donoraankomsten binnen het beschouwde tijdsvenster. In de praktijk is deze informatie niet beschikbaar en moeten planningsbeslissingen worden genomen op het moment dat nieuwe donoren beschikbaar komen. Daarom wordt een simulatiemodel ontwikkeld

waarin donoren online aan teams worden toegewezen met behulp van heuristieken. Beslissingen worden uitsluitend gebaseerd op de informatie die op dat moment beschikbaar is, wat een realistischer beeld geeft van wat praktisch haalbaar is.

De simulatiemodellen voor het decentrale en het gedeeltelijk centrale scenario zijn grotendeels identiek. Beide modellen gebruiken dezelfde simulatiestructuur, teamstructuur en heuristieken. Het belangrijkste verschil is dat een donor in het gedeeltelijk centrale scenario meerdere opeenvolgende processtappen doorloopt, terwijl er bij een donor in het decentrale scenario één enkele uitnametaak hoort. Om deze reden wordt eerst het algemene (decentrale) simulatiemodel beschreven. Voor het volledig centrale scenario is geen simulatie gemaakt, omdat dat scenario veel slechtere resultaten had bij de MILP-modellen dan het gedeeltelijk centrale scenario, zie Paragraaf 5.1 en 5.2.

In de volgende paragrafen worden achtereenvolgens de gebruikte invoergegevens, de toestand van het simulatiemodel, de beslissingsmomenten, de geldigheidsvoorwaarden voor toewijzingen, de uitbreiding voor het gedeeltelijk centrale scenario, de ontwikkelde heuristieken en de gebruikte maatstaven beschreven.

4.2.1 Invoergegevens

Voor de simulaties wordt dezelfde historische donordata gebruikt als voor de MILP-modellen. Hierdoor kunnen verschillen in de resultaten volledig worden toegeschreven aan de gebruikte planningsmethode en niet aan verschillen in de invoer.

Voor iedere donor worden dezelfde gegevens gebruikt als in Paragraaf 4.1: het acceptatietijdstip, het tijdstip van circulatiestop, de locatie van de donor, de geaccepteerde weefsels en de daadwerkelijk uitgenomen weefsels. Het acceptatietijdstip bepaalt het aankomstmoment van een donor in de simulatie. Op basis van het tijdstip van circulatiestop wordt een deadline berekend van 24 uur na deze circulatiestop. De geaccepteerde weefsels bepalen het donortype in het decentrale scenario. In het gedeeltelijk centrale scenario worden het benodigde teamtype en de uitnameduur afgeleid van de daadwerkelijk uitgevoerde uitnames, omdat na de schouw precies bekend is welke weefsels uitgenomen zullen worden. Op dezelfde wijze als in de MILP-modellen worden hiervoor vaste uitnameduren per weefseltype gebruikt.

Ook dezelfde teamconfiguraties worden gebruikt als in de MILP-modellen. In het decentrale scenario worden de huidige WUON-teams met hun bestaande bevoegdheden, thuislocaties, diensttijden, maximale werktijden en teamgroottes gemodelleerd. In het gedeeltelijk centrale scenario wordt dezelfde aangepaste teamstructuur gebruikt als in het gedeeltelijk centrale MILP-model, inclusief dezelfde centrale locatie voor de uitvoering van de uitnames.

De werkwijze sluit eveneens aan bij de aannames van de MILP-modellen. In het decentrale scenario vinden schouw, voorbereiding en uitname plaats op de donorlocatie. In het gedeeltelijk centrale scenario worden donoren eerst geschouwd, dan naar het uitnamecentrum vervoerd, waarna de uitname daar wordt uitgevoerd en het lichaam vervolgens wordt teruggebracht naar de oorspronkelijke locatie.

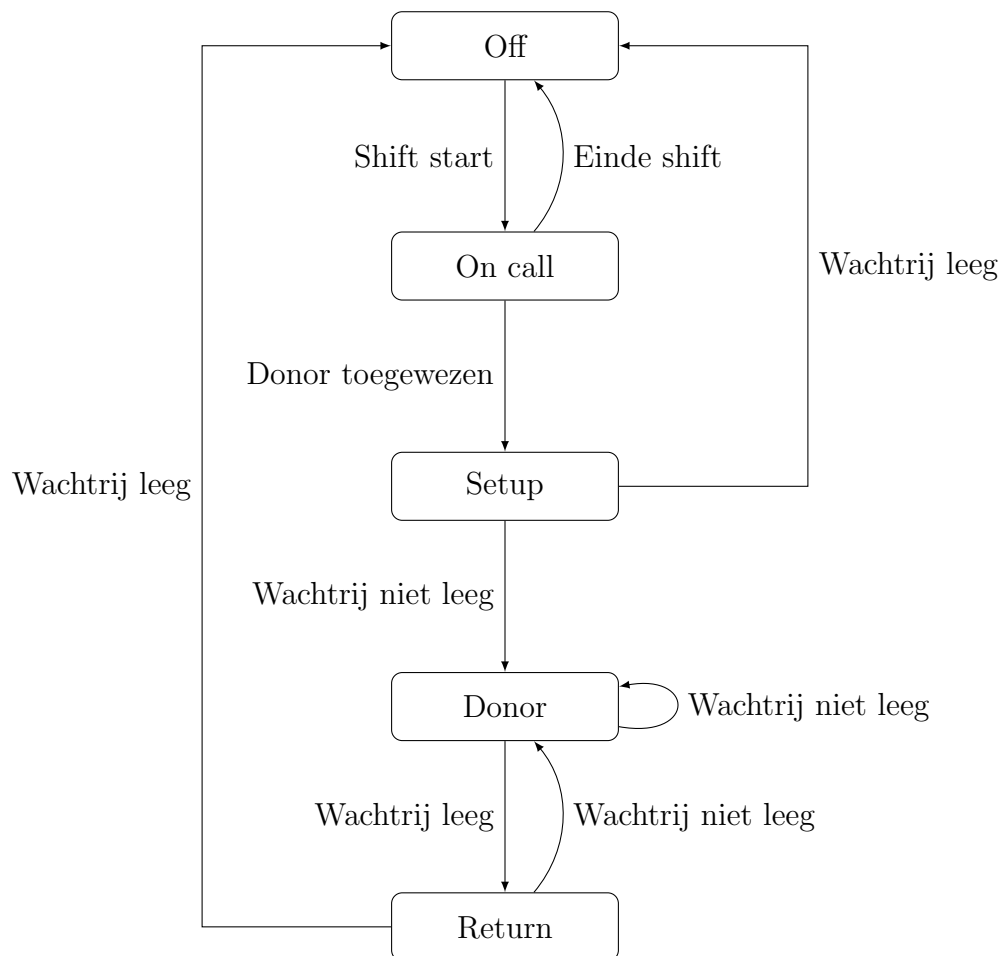
Daarnaast worden dezelfde reistijdmatrix, voorbereidingstijden, set-uptijden, bevoegdheidsniveaus en overige parameters gebruikt als in de MILP-modellen. Hierdoor zijn de resultaten van de simulaties en de MILP-modellen direct met elkaar vergelijkbaar.

4.2.2 Simulatiemodel

De simulatie wordt opgevat als een toestandsafhankelijk beslissingsproces. Op ieder moment bevindt het systeem zich in een bepaalde toestand, bestaande uit de actuele status van alle teams en de verzameling donoren die beschikbaar zijn voor planning. Voor ieder team wordt een teamtoestand bijgehouden die onder meer bestaat uit:

- de huidige status van het team (buiten dienst, beschikbaar, bezig met set-up, bezig met een donor of bezig met de terugreis);
- de huidige locatie van het team;
- de taak die momenteel wordt uitgevoerd;
- de resterende duur van de huidige taak;
- de reeds gewerkte uren binnen de huidige dienst;
- de wachtrij van reeds toegewezen donoren (of donortaken) binnen de huidige dienst;
- de wachtrij van reeds toegewezen donoren (of donortaken) voor de eerstvolgende dienst.

De mogelijke teamstatussen en de overgangen daartussen zijn weergegeven in Figuur 2. De overgangen worden bepaald door gebeurtenissen zoals het begin of einde van een shift, het toewijzen van een donor aan een team, en het afronden van een taak, en de inhoud van de wachtrij van het team.



Figuur 2: Statusdiagram van een team binnen het simulatiemodel.

Om de simulatie eenvoudig te houden is ervoor gekozen om werkende teams buiten dienst ('off') te stellen zodra zij geen enkele actieve of geplande taak meer hebben. Dat weerspiegelt ook de werkwijze van WUON. In enkele gevallen kan het ertoe leiden dat een team na de set-up gelijk stopt, als tijdens de set-up een beslissingsmoment is geweest waardoor de wachtrij van dat team leeg is geworden.

De wachtrijen bevatten de donoren die reeds aan een team zijn toegewezen maar waarvan de behandeling nog niet is gestart. Donoren in een wachtrij worden behandeld in de volgorde waarin zij in die wachtrij voorkomen.

Naast de toestand van de teams wordt bijgehouden welke donoren beschikbaar zijn voor planning. Een donor kan zich daarbij in één van twee situaties bevinden: de donor wacht nog op toewijzing of de donor is reeds opgenomen in de wachtrij van een team. Wanneer een donor niet aan een geldig team kan worden toegewezen, wordt deze donor als niet-verwerkt geregistreerd.

4.2.3 Beslissingsmomenten en simulatieverloop

De simulatie is gebeurtenisgestuurd ('event driven') en maakt op ieder beslissingsmoment een nieuwe toewijzing van beschikbare donoren aan teams. Algoritme 1 geeft een overzicht van het algemene simulatieverloop. Vervolgens worden de afzonderlijke stappen nader toegelicht en de betekenissen van de termen besproken.

Algoritme 1 Algemeen simulatie-algoritme

```
1: Maak een event queue met voor iedere donor een aankomstevent, gesorteerd op oplopende
   aankomsttijd
2: Initialiseer alle teams op het aankomstmoment van de eerste donor
3: while event queue niet leeg do
4:   Haal het eerstvolgende aankomstevent uit de event queue
5:   Rol de simulatietijd vooruit tot de aankomsttijd van dit event
6:   Werk de toestand van alle teams bij
7:   Voeg eventueel nieuw vrijgegeven donoren/donortaken toe aan de event queue met de
   huidige tijd als aankomsttijd
8:   Maak een donorpool bestaande uit de aangekomen donor(taak) en alle reeds toegewezen
   maar nog niet gestarte donoren
9:   Leeg de wachtrijen van de teams
10:  Bepaal met de gekozen heuristiek een nieuwe toewijzing van de volledige donorpool
11:  Voeg de donoren toe aan de wachtrijen van de toegewezen teams
12: end while
13: while er nog actieve taken of niet-lege wachtrijen bestaan do
14:   Rol de simulatie vooruit tot de eerstvolgende afronding van een taak of teamtoestandswisse-
   ling
15:   Werk de toestand van alle teams bij
16:   if nieuwe donor(stadia) zijn vrijgekomen then
17:     Maak een donorpool bestaande uit de nieuw vrijgekomen donor(stadia) en alle reeds
     toegewezen maar nog niet gestarte donoren
18:     Leeg de wachtrijen van de teams
19:     Bepaal met de gekozen heuristiek een nieuwe toewijzing van de volledige donorpool
20:     Voeg de donoren toe aan de wachtrijen van de toegewezen teams
21:   end if
22: end while
23: Bereken de waardes van de maatstaven
```

In het decentrale scenario ontstaat een beslissingsmoment telkens wanneer een nieuwe donor beschikbaar komt voor planning, op het moment van de donoracceptatie. In het gedeeltelijk centrale scenario kunnen daarnaast ook nieuwe beslissingsmomenten ontstaan wanneer een donor een volgend stadium van het uitnameproces bereikt. Door een fout in de code van de gedeeltelijk centrale simulatie worden die nieuwe beslissingsmomenten pas toegevoegd op het moment dat een taak afgerond is, wat dus alleen gebeurt tijdens het vooruitrollen van de tijd bij het eerstvolgende bestaande beslissingsmoment. Eigenlijk had het nieuwe aankomstmoment al bij de planning aan de event queue toegevoegd moeten worden op de geplande eindtijd van de voorafgaande taak. Door deze fout worden sommige taken mogelijk niet zo vroeg ingepland als ze zouden kunnen zijn.

De simulatie start op het aankomstmoment van de eerste donor. Op dat tijdstip worden alle teams geïnitieerd in de toestand die overeenkomt met hun dienstrooster. Teams die zich binnen hun dienstvenster bevinden zijn beschikbaar voor werk ('on call'), terwijl de overige teams buiten dienst ('off') zijn.

Bij ieder volgend beslissingsmoment wordt eerst de tijd vooruitgerold vanaf het vorige beslissingsmoment. Tijdens deze stap worden alle teams bijgewerkt op basis van de verstreken tijd.

Hierdoor kunnen taken worden afgerond, kan een team doorgaan naar een volgende taak in zijn wachtrij, kan een terugreis worden gestart nadat de laatste donor is behandeld, of kan een dienst beginnen of eindigen. Op deze wijze ontstaat de actuele toestand van het systeem op het moment van de nieuwe donoraankomst.

Nadat de toestanden van alle teams zijn bijgewerkt, wordt een nieuwe planningsbeslissing genomen. Hierbij worden alle nog niet gestarte donortaken verzameld in één donorpool. Deze donorpool bestaat uit de nieuw aangekomen donor en alle donoren die reeds aan een team waren toegewezen maar waarvan de behandeling nog niet is gestart. Daarna worden de wachtrijen van alle teams tijdelijk leeggemaakt.

Vervolgens wordt de gekozen heuristiek toegepast op de volledige donorpool. Hierdoor kunnen reeds geplande maar nog niet gestarte donortaken opnieuw worden toegewezen. Het simulatiemodel gebruikt dus een rolling-horizon benadering waarbij de planning bij ieder beslissingsmoment wordt herzien op basis van de meest recente systeemtoestand.

Om de haalbaarheid van toewijzingen te beoordelen, maakt de heuristiek gebruik van een schaduwkopie van de actuele systeemtoestand. Donoren worden één voor één aan deze schaduwtoestand toegevoegd. Hierdoor houden haalbaarheidscontroles rekening met eerder gemaakte toewijzingen binnen hetzelfde beslissingsmoment. Bijvoorbeeld wanneer meerdere donoren aan dezelfde wachtrij worden toegevoegd, beïnvloeden de eerdere toewijzingen de resterende capaciteit van het betreffende team.

Na afloop bepaalt de heuristiek een volledige toewijzing van de donorpool aan de teams en hun wachtrijen. Deze toewijzing wordt vervolgens toegepast op de werkelijke systeemtoestand. De donoren worden daarbij toegevoegd aan de wachtrijen in de volgorde die door de heuristiek is bepaald. Alle toegewezen taken worden daarna automatisch uitgevoerd volgens de volgorde van de wachtrij.

Dit proces wordt herhaald voor iedere nieuwe donoraankomst. Nadat de laatste donor is aangekomen, wordt de simulatie verder vooruitgerold totdat alle teams hun resterende taken hebben afgerond en geen actieve taken of wachtrijen meer aanwezig zijn. De tweede while-loop in Algoritme 1 zorgt ervoor dat alle resterende donortaken nog worden uitgevoerd, inclusief degene in de gedeeltelijk centrale simulatie die pas na het afronden van een andere taak hun aankomstmoment hebben. Ten slotte worden de waardes van de maatstaven berekend.

4.2.4 Toelaatbare toewijzingen

Niet iedere mogelijke toewijzing van donoren aan teams is toegestaan. Om een donor aan een team toe te kunnen wijzen moet de resulterende planning voldoen aan een aantal voorwaarden. Deze voorwaarden komen grotendeels overeen met de voorwaarden uit het MILP-model, maar worden hier gecontroleerd op basis van de actuele toestand en de reeds geplande taken van het betreffende team.

Een toewijzing is alleen toegestaan als aan alle onderstaande voorwaarden wordt voldaan:

- Het team beschikt over de vereiste bevoegdheid voor het betreffende donortype.
- Met de uitname kan gestart worden vóór de deadline van de donor.
- Alle werkzaamheden, inclusief eventuele terugreis naar de thuislocatie, kunnen worden afgerond vóór het einde van de betreffende shift.
- De totale geplande werktijd binnen de shift overschrijdt de maximale werktijd van het team niet.

- De benodigde reistijden tussen opeenvolgende taken zijn haalbaar binnen de bestaande planning van het team.

Daarnaast moet iedere donor hoogstens één keer worden verwerkt en kan een team slechts één taak tegelijk uitvoeren. Deze voorwaarden worden automatisch afgedwongen door de opbouw van het simulatiemodel. Binnen één beslissingsmoment komt iedere donor hoogstens één keer voor in de donorpool en kan daardoor slechts aan één team worden toegewezen. Bovendien worden taken binnen een team altijd sequentieel uitgevoerd volgens de volgorde van de wachtrij, waardoor overlap tussen taken niet mogelijk is.

Omdat de haalbaarheid van een nieuwe donortask afhangt van eerder geplande taken, worden de controles uitgevoerd op een schaduwkopie van de actuele systeemtoestand, zoals in Paragraaf 4.2.3 is besproken.

4.2.5 Gedeeltelijk centraal scenario

Het simulatiemodel voor het gedeeltelijk centrale scenario bouwt voort op het eerder beschreven model, maar vervangt de uitname op de donorlocatie door een proces waarin meerdere opeenvolgende stappen worden doorlopen.

In plaats van een donor als één enkele taak te modelleren, wordt iedere donor gemodelleerd als een combinatie van een donor en een taak binnen het proces. Afhankelijk van het type donor kan dit proces uit meerdere taken bestaan. Nadat een taak is voltooid, komt de donor opnieuw beschikbaar voor planning met de volgende taak van het proces.

Voor donoren voor wie centralisatie nodig is, bestaat het proces uit de volgende taken:

1. schouw en transport van de donor naar het uitnamecentrum;
2. uitname van de geaccepteerde weefsels op het uitnamecentrum;
3. terugbrengen van de donor naar de oorspronkelijke locatie.

Voor donoren bij wie uitsluitend cornea of geen enkel weefsel wordt uitgenomen bestaat het proces uit één enkele taak. Deze donoren worden volledig op de donorlocatie afgehandeld.

Doordat het proces uit meerdere taken kan bestaan, kunnen dezelfde donoren meerdere malen gedurende een simulatie als nieuwe aankomst verschijnen. Nadat een taak is voltooid, wordt voor de betreffende donor automatisch een nieuw aankomst-gebeurtenis (event) aangemaakt voor de eerstvolgende taak in het proces. Het was de bedoeling om de aankomsttijd van deze gebeurtenis gelijk te stellen aan het tijdstip waarop de vorige taak werd afgerond. Hierdoor zou direct een nieuw beslissingsmoment ontstaan waarop de volgende taak van deze donor samen met eventuele andere beschikbare donoren wordt meegenomen in de herplanning. In tegenstelling tot het decentrale scenario worden hierdoor niet alleen nieuwe donoren, maar ook vervolgtaken van reeds bekende donoren als afzonderlijke gebeurtenissen in de simulatie verwerkt. Door de hierboven vermelde fout in de code is dit echter niet goed geïmplementeerd, en zijn de aankomsten van nieuwe taken nu op hetzelfde tijdstip als de eerstvolgende aankomst in de event queue. Hierdoor worden ook onnodig meerdere planningen op hetzelfde moment gemaakt.

De taak van een donor bepaalt samen met het donortype welke teams in aanmerking komen voor uitvoering van de taak. Teams van type 2, 3 en 4 worden uitsluitend ingezet voor de centrale uitnames. Teams van type 1 verzorgen de schouw, het transport naar het uitnamecentrum, de afhandeling van corneadonoren en het terugbrengen van donoren naar de oorspronkelijke locatie.

Net als in het MILP-model wordt voor de uitname een deadline gehanteerd die is afgeleid van het tijdstip van circulatiestop. Voor het terugbrengen van een donor wordt een afzonderlijke deadline

gebruikt van 48 uur na het acceptatietijdstip van de donor. Hierdoor kan het terugtransport flexibel worden ingepland, terwijl de kwaliteitseisen voor de uitname behouden blijven.

Afgezien van deze uitbreidingen blijven het simulatieverloop, de teamtoestanden, de beslissingsmomenten en de gebruikte heuristieken identiek aan die van het decentrale scenario.

4.2.6 Heuristieken

Tijdens ieder beslissingsmoment moet voor iedere donor(taak) in de donorpool worden bepaald aan welk team deze wordt toegewezen. In de rest van deze paragraaf wordt de algemene beschrijving van de decentrale simulatie gebruikt, waarbij bij elke donor één taak hoort. Voor de gedeeltelijk centrale simulatie kan de term ‘donor’ over het algemeen vervangen worden door een donortaak.

Het aantal mogelijke toewijzingen groeit snel met het aantal beschikbare teams en donoren. Omdat beslissingen bovendien online moeten worden genomen, is het niet haalbaar om op ieder beslissingsmoment een volledig optimalisatieprobleem op te lossen. Daarom worden heuristieken toegepast om snel tot een redelijk goede toewijzing te komen.

Alle heuristieken verwerken de beschikbare donoren in volgorde van oplopende urgentie. Hiervoor wordt het Earliest Deadline First (EDF)-principe gebruikt: donoren met de vroegste deadline worden als eerste ingepland. Voor iedere donor wordt vervolgens bepaald aan welk team de donor wordt toegewezen, en aan welke shift van dat team. Teams hebben namelijk een wachtrij voor hun huidige shift en voor de eerstvolgende shift. Daarbij worden uitsluitend toelaatbare toewijzingen beschouwd zoals beschreven in Paragraaf 4.2.4.

De eerste heuristiek (H1) combineert EDF met een dichtstbijzijnde-teamstrategie. Voor iedere donor wordt bepaald welke teams de donor op een toelaatbare manier kunnen verwerken. Vervolgens wordt de donor toegewezen aan het team waarvan de geplande locatie het dichtst bij de donor ligt. Het doel hiervan is de reistijden zo klein mogelijk te houden.

Algoritme 2 Heuristiek H1: EDF + dichtstbijzijnde team

```
1: Maak een schaduwkopie van alle teams
2: Sorteer de donoren op oplopende deadline
3: for iedere donor  $d$  do
4:   Bepaal alle toelaatbare team-queue combinaties
5:   for iedere toelaatbare team-queue combinatie  $(t, q)$  do
6:     Bepaal de geplande locatie van team  $t$ 
7:     Bereken de afstand van deze locatie naar donor  $d$ 
8:   end for
9:   Selecteer de eerste team-queue combinatie met de kleinste afstand, als deze bestaat
10:  if een team-queue combinatie is geselecteerd then
11:    Voeg donor  $d$  toe aan de toewijzing met de geselecteerde team-queue combinatie
12:    Werk de schaduwtoestand van het geselecteerde team bij
13:  else
14:    Markeer donor  $d$  als niet toegewezen
15:  end if
16: end for
17: Retourneer de volledige toewijzing
```

Bij H1 kunnen meerdere teams zich op dezelfde minimale reisafstand van een donor bevinden, vooral als het de thuisbasis betreft. Daarom voegt de tweede heuristiek (H2) een extra selectie criterium toe. Indien meerdere teams dezelfde minimale reisafstand hebben, wordt de donor toegewezen aan het team dat het vroegst beschikbaar is voor uitvoering van de taak. Hierdoor wordt de duur tussen circulatiestop en uitname voor donoren zoveel mogelijk beperkt.

Algoritme 3 Heuristiek H2: EDF + dichtstbijzijnde team + vroegste beschikbaarheid

```

1: Maak een schaduwkopie van alle teams
2: Sorteer de donoren op oplopende deadline
3: for iedere donor  $d$  do
4:   Bepaal alle toelaatbare team-queue combinaties
5:   for iedere toelaatbare team-queue combinatie  $(t, q)$  do
6:     Bepaal de geplande locatie van team  $t$ 
7:     Bereken de afstand naar donor  $d$ 
8:   end for
9:   Selecteer de combinatie met minimale afstand, als deze bestaat. Bij gelijke afstand wordt
   de combinatie met de vroegste mogelijke starttijd gekozen.
10:  if een team-queue combinatie is geselecteerd then
11:    Voeg donor  $d$  toe aan de toewijzing met de geselecteerde combinatie
12:    Werk de schaduwtoestand van het geselecteerde team bij
13:  else
14:    Markeer donor  $d$  als niet toegewezen
15:  end if
16: end for
17: Retourneer de volledige toewijzing

```

Een nadeel van H1 en H2 is dat uitsluitend naar reistijd wordt gekeken. Hierdoor kan een donor worden toegewezen aan een groot team terwijl een iets verder verwijderd maar kleiner team dezelfde donor eveneens kan verwerken. Omdat de berekende personeelskosten evenredig zijn met de teamgrootte, leidt dit niet noodzakelijk tot een efficiënte inzet van personeel. Om hiermee rekening te houden is de derde heuristiek (H3) ontwikkeld.

Net als H1 en H2 verwerkt H3 de donoren volgens EDF. Voor iedere donor wordt vervolgens voor elk toelaatbaar team bepaald hoeveel extra personeelsuren de toewijzing van deze donor veroorzaakt. De marginale toename in personeelsuren bestaat uit de extra reistijd, voorbereidingstijd, verwerkingstijd en eventuele wijziging van de terugreis, vermenigvuldigd met de teamgrootte.

De donor wordt toegewezen aan het team waarvoor deze marginale toename in personeelsuren minimaal is. Indien meerdere teams dezelfde marginale kosten hebben, wordt gekozen voor het team dat het vroegst beschikbaar is.

Algoritme 4 Heuristiek H3: EDF + minimale marginale personeelsuren

```
1: Maak een schaduwkopie van alle teams
2: Sorteer de donoren op oplopende deadline
3: for iedere donor  $d$  do
4:   Bepaal alle toelaatbare team-queue combinaties
5:   for iedere toelaatbare team-queue combinatie  $(t, q)$  do
6:     Bereken de marginale toename in personeelsuren
7:   end for
8:   Selecteer de combinatie met minimale marginale personeelsuren, als deze bestaat. Bij gelijke
   kosten wordt de combinatie met de vroegste mogelijke starttijd gekozen.
9:   if een team-queue combinatie is geselecteerd then
10:    Voeg donor  $d$  toe aan de toewijzing, met de geselecteerde combinatie
11:    Werk de schaduwtoestand van het geselecteerde team bij
12:   else
13:    Markeer donor  $d$  als niet toegewezen
14:   end if
15: end for
16: Retourneer de volledige toewijzing
```

Hoewel H3 rekening houdt met de extra personeelsuren van een toewijzing, worden donoren nog steeds sequentieel aan wachtrijen toegevoegd. Hierdoor is de uiteindelijke volgorde van donoren binnen een wachtrij niet noodzakelijk optimaal. Het kan bijvoorbeeld gunstiger zijn om een later toegewezen donor tussen reeds geplande donoren in te plannen dan aan het einde van de wachtrij.

De vierde heuristiek (H4) gebruikt dezelfde teamtoewijzingen als H3. Zodra vastligt welke donoren aan een bepaalde shift zijn toegewezen, liggen de verwerkingstijden, voorbereidingstijden, teamgrootte en het aantal benodigde taken vast. De enige component van de totale duur die dan nog kan veranderen is de reistijd tussen opeenvolgende donoren. Daarom worden voor iedere wachtrij alle mogelijke permutaties van de aan die wachtrij toegewezen donoren beschouwd. Van deze permutaties wordt de toelaatbare volgorde gekozen waarvoor de totale routekosten minimaal zijn. Hierdoor kan H4 tot minder personeelsuren leiden dan H3.

Algoritme 5 Heuristiek H4: H3 met volgorde-optimalisatie

```
1: Bepaal een initiële toewijzing met behulp van H3
2: for iedere team-queue combinatie  $(t, q)$  do
3:   Genereer alle permutaties van de aan  $(t, q)$  toegewezen donoren
4:   for iedere permutatie do
5:     Bereken de totale routekosten
6:   end for
7:   Sorteer de permutaties op oplopende routekosten
8:   Selecteer de eerste toelaatbare permutatie in deze volgorde
9:   Vervang de bestaande donorvolgorde door deze permutatie
10: end for
11: Retourneer de volledige toewijzing
```

4.2.7 Maatstaven

Tijdens de simulatie wordt een logbestand bijgehouden met voor iedere uitgevoerde taak onder andere het team, de donor, het taaktype, de begin- en eindtijd en de betrokken locaties. Op basis van deze informatie kunnen waarden van verschillende maatstaven ('metrics') worden berekend.

Een van de belangrijkste maatstaven in dit onderzoek is het totaal aantal personeelsuren. Voor ieder team wordt de totale gewerkte tijd bepaald en vermenigvuldigd met de grootte van het team. Door deze waarden te sommeren over alle teams ontstaat het totale aantal ingezette personeelsuren.

Daarnaast wordt het aantal niet-verwerkte donoren bijgehouden. Een donor wordt als niet-verwerkt beschouwd wanneer het volledige proces niet succesvol is afgerond. In het gedeeltelijk centrale scenario wordt bovendien geregistreerd in welk stadium van het proces een donor eventueel 'uitvalt'. Het kan namelijk voorkomen dat een donor wel naar het uitnamecentrum is gebracht, maar dat de uitname niet kan worden ingepland.

Ten slotte worden statistieken op teamniveau bijgehouden, waaronder de totale gewerkte uren per team en de langste gerealiseerde dienstduur per team. Deze informatie maakt het mogelijk om verschillen in werkbelasting tussen teams te analyseren.

Deze maatstaven maken het mogelijk om de verschillende heuristieken onderling te vergelijken en de resulterende personeelsinzet en donorverwerkingsgraad te vergelijken met de resultaten van de MILP-modellen.

5 Experimenten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de experimenten besproken en waar mogelijk verklaard. Eerst worden enkele resultaten van de drie MILP-modellen besproken, waaronder de donorverwerkingsgraad. Vervolgens worden die modellen in meer detail met elkaar vergeleken. Ten slotte worden de resultaten van de simulaties besproken, en vergeleken met de resultaten van de MILP-modellen.

5.1 MILP-modellen

Voor de drie scenario's werd een optimalisatie uitgevoerd op de historische donordata van de periode 1 januari 2024 t/m 31 december 2025. Er werd een dag buiten beschouwing gelaten, namelijk 7 november 2025, omdat het decentrale model geen oplossing had gevonden binnen de ingestelde tijdslimiet. De optimalisaties zijn daardoor uitgevoerd op 730 dagen, met in totaal 6865 donoren in de dataset.

Zoals vermeld in Paragraaf 4.1.7, zijn voor de 730 dagen onafhankelijke schema's gemaakt. Iedere iteratie optimaliseert een tijdsvenster van 24 uur aan donoraankomsten, waarbij de taken zowel op die dag als de volgende dag ingepland kunnen worden. Hierdoor ontstaat er niet per se een realistisch schema voor de periode 2024-2025 door alle kleine schema's bij elkaar te nemen.

Tabel 7 toont het aantal verwerkte en niet-verwerkte donoren per scenario over deze periode. In de modellen wordt een donor als verwerkt beschouwd wanneer een toelaatbare planning is gevonden en alle uiteindelijk explanteerbare weefsels zijn uitgenomen.

Scenario	Verwerkte donoren	Niet-verwerkte donoren	Verwerkt (%)
Decentraal	6811	54	99,2
Gedeeltelijk centraal	6834	31	99,5
Volledig centraal	6597	268	96,1

Tabel 7: Aantal verwerkte en niet-verwerkte donoren per scenario.

Tabel 8 toont voor elk scenario het aantal beschikbare en succesvol geëxplanteerde weefsels. De prestaties verschillen per weefseltype.

Weefsel	Beschikbaar	Decentraal	Gedeeltelijk centraal	Volledig centraal
Cornea	5885	5843 (99,3%)	5864 (99,6%)	5629 (95,6%)
Huid	756	749 (99,1%)	744 (98,4%)	721 (95,4%)
Hartklep	340	303 (89,1%)	330 (97,1%)	319 (93,8%)
Bot	281	227 (80,8%)	263 (93,6%)	252 (89,7%)

Tabel 8: Aantal beschikbare en geëxplanteerde weefsels per scenario. Tussen haakjes staat het percentage van beschikbare weefsels dat werd geëxplanteerd.

Om de verschillen tussen de scenario's beter te begrijpen, worden in de volgende paragrafen de niet-verwerkte donoren nader geanalyseerd. Hierbij wordt onderzocht welke beperkingen verantwoordelijk waren voor het niet kunnen inplannen van deze donoren.

5.1.1 Decentraal scenario

Bij het decentrale scenario waren alle niet-verwerkte donoren van donortype 4, oftewel donoren die waren geaccepteerd voor een botuitname. Deze donoren zijn verantwoordelijk voor alle niet-geëxplanteerde botweefsels die in Tabel 8 zijn gerapporteerd. Voor deze donoren kon het model geen toelaatbare planning vinden die voldeed aan alle opgelegde beperkingen, waaronder de maximale dienstduur, teamcapaciteit en beschikbaarheid van personeel. Analyse van de niet-verwerkte donoren wijst op drie mogelijke oorzaken.

Ten eerste kan de maximale dienstduur van 14 uur een beperkende factor zijn geweest. Voor een botteam bestaat de totale dienstduur uit vaste werkzaamheden (1 uur voorbereiding en 0,5 uur schouw), reistijd van en naar de donorlocatie en een uitnameduur van circa 6 tot 8,8 uur (als bot daadwerkelijk wordt uitgenomen). Donoren met een lange uitnameduur en een grote reisafstand kunnen daardoor niet meer binnen de maximale dienstduur worden ingepland. Bij een uitnameduur van 8,8 uur resteert bijvoorbeeld nog 3,7 uur voor de totale reistijd, wat overeenkomt met maximaal 1 uur en 51 minuten per enkele reis.

Ten tweede kan de aanwezigheid van andere donoren van hetzelfde type op dezelfde dag hebben geleid tot onvoldoende beschikbare capaciteit. In het decentrale scenario is (net als de andere twee scenario's) per dag slechts één botteam beschikbaar. Wanneer meerdere botdonoren zich op dezelfde dag aandienen en geen van deze donoren naar een volgende dienst kan worden verschoven, of wanneer de daaropvolgende dienst reeds volledig bezet is, kan niet elke donor worden verwerkt.

Ten derde kan capaciteit van botteams zijn gebruikt voor donoren van lagere donortypen. Omdat hogere donortypen ook geschikt zijn voor minder complexe uitnames, kunnen zij volgens de modellen worden ingezet wanneer de gespecialiseerde teams voor deze donoren reeds volledig bezet zijn. Hierdoor neemt de beschikbare capaciteit voor type-4 donoren af. In de huidige werkwijze van WUON zou in een dergelijke situatie de botdonor voorrang krijgen, waardoor één of meerdere donoren van een lager type niet zouden worden verwerkt. Deze prioritering is echter niet opgenomen in de modellen. De optimalisatie minimaliseert primair het totale aantal niet-verwerkte donoren en secundair het aantal benodigde personeelsuren.

Figuur 3 toont de geografische spreiding van de niet-verwerkte type-4 donoren in het decentrale scenario. Opvallend is dat de meeste donoren die geen andere type-4 donoren op dezelfde dag hadden, zich in het uiterste (noord-)oostelijke of uiterste zuidelijke deel van Nederland bevinden. Bij deze donoren was bovendien een uitnameduur van minstens acht uur. Dit suggereert dat in deze gevallen de combinatie van reistijd en uitnameduur heeft geleid tot overschrijding van de maximale dienstduur.

Daarnaast zijn er twee niet-verwerkte donoren zonder andere type-4 donoren op dezelfde dag die meer centraal in Nederland zijn gelegen. Omdat de reisafstand voor deze donoren beperkter is, lijkt overschrijding van de maximale dienstduur hier minder waarschijnlijk. Dit wijst erop dat inzet van botteams voor donoren van lagere donortypen een mogelijke verklaring vormt.

Voor de overige niet-verwerkte donoren is geen eenduidige oorzaak vast te stellen. In deze gevallen kunnen zowel de maximale dienstduur als concurrentie met andere type-4 donoren en capaciteitsgebruik door lagere donortypen een rol hebben gespeeld.

5.1.2 Gedeeltelijk centraal scenario

Bij het gedeeltelijk centrale scenario werden in totaal 31 donoren niet verwerkt. In tegenstelling tot het decentrale scenario betroffen deze donoren niet uitsluitend acceptatietype 4. Van de

Aantal andere type-4 donoren
dezelfde dag

- 0 andere type-4 donoren
- 1 andere type-4 donor
- 2 andere type-4 donoren

Map showing the distribution of type-4 donors across the Netherlands, categorized by the number of other type-4 donors in the same region (0, 1, or 2). The map includes major cities and regions, with data points marked by colored circles and 'X' symbols. The legend indicates that green circles represent 0 other type-4 donors, orange circles represent 1 other type-4 donor, and red circles represent 2 other type-4 donors. The map also shows the number of donors for each region, with values ranging from 6.0 to 8.8.

40

niet-verwerkte donoren behoorde 1 donor tot acceptatietype 1, 10 donoren tot acceptatietype 2, 2 donoren tot acceptatietype 3 en 18 donoren tot acceptatietype 4. Dit wijst erop dat in het gedeeltelijk centrale scenario niet langer uitsluitend de capaciteit voor botuitnames beperkend was, maar dat ook andere onderdelen van het proces, met name het transport, tot donoruitval konden leiden.

De enige niet-verwerkte donor van type 1 werd veroorzaakt door een zeer beperkte tijd tussen het acceptatiemoment van de donor en het verstrijken van de maximale uitnametermijn. Deze resterende tijd bedroeg minder dan twee uur. Nadat een donor is geaccepteerd, moet een team eerst naar de donorlocatie reizen en moet de schouw plaatsvinden voordat met de uitname kan worden begonnen. Voor deze donor, afkomstig uit Leeuwarden, bleek de resterende tijd onvoldoende om deze stappen nog binnen de toegestane termijn te doorlopen. Bij het decentrale scenario kon deze donor wel ingepland worden, omdat er al een team dichtbij was op het acceptatiemoment.

Voor de type 2- en type 3-donoren bleek op basis van inspectie van de gegenereerde plannings dat vooral de capaciteit van de cornea-/transportteams beperkend was. Dit gold met name voor de twee nachtteams. Deze teams verrichten zowel corneautnames als donortransport. De betreffende donoren deden zich bovendien voornamelijk voor op dagen met een bovengemiddeld aantal donoren, waardoor de beschikbare capaciteit van deze teams volledig werd benut.

De meeste niet-verwerkte type 4-donoren kwamen voor op dagen waarop meerdere botdonoren aanwezig waren. Van de 18 niet-verwerkte type 4-donoren hadden er 16 ten minste twee andere type 4-donoren op dezelfde dag. Voor deze donoren lijkt de combinatie van beperkte botteamcapaciteit en transportcapaciteit de meest waarschijnlijke verklaring. Voor de twee resterende type 4-donoren werd de planning beperkt door respectievelijk een reeds volledig bezette botteamdienst en een tekort aan beschikbare transportcapaciteit.

5.1.3 Volledig centraal scenario

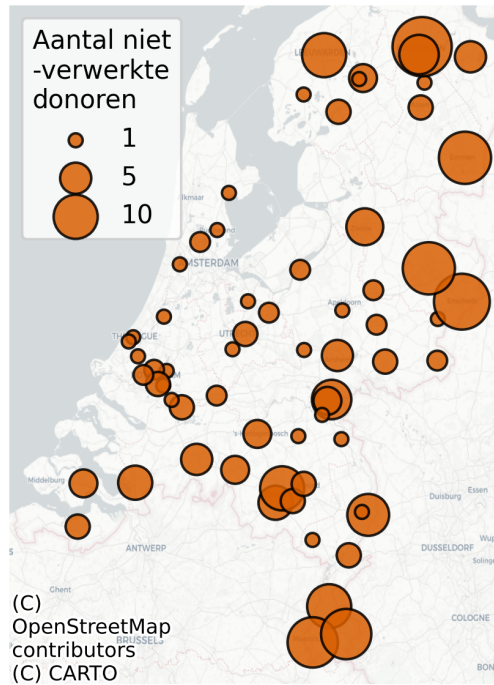
Bij het volledig centrale scenario konden volgens het model in totaal 268 donoren niet worden ingepland. Hiervan behoorden 192 donoren tot acceptatietype 1, 39 donoren tot acceptatietype 2, 8 donoren tot acceptatietype 3 en 29 donoren tot acceptatietype 4.

Figuur 4 toont de geografische spreiding van de niet-verwerkte donoren. Opvallend is dat de niet-verwerkte donoren niet gelijkmatig over Nederland zijn verdeeld. Met name in de noordelijke, oostelijke en zuidelijke regio's komen relatief veel niet-verwerkte donoren voor. Deze regio's liggen op grotere afstand van het centrale uitnamecentrum, waardoor relatief veel transportcapaciteit nodig is om deze donoren te verwerken.

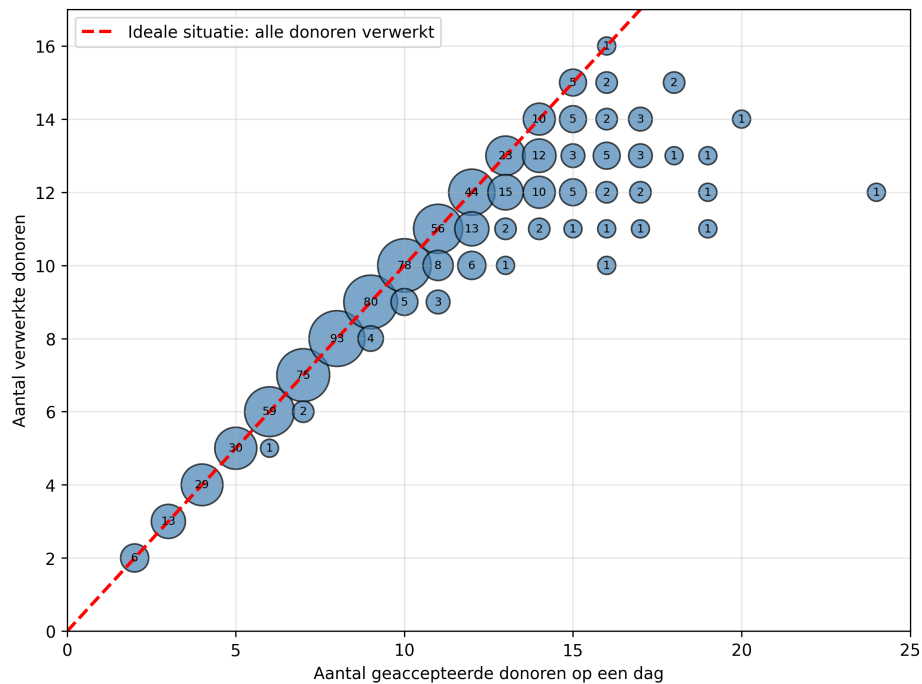
Net als bij het gedeeltelijk centrale scenario lijkt voor de niet-verwerkte type 4-donoren de capaciteit van het botteam de voornaamste beperkende factor te zijn. Voor de overige donortypen blijkt echter uit inspectie van een groot aantal oplossingen dat vooral de transportcapaciteit de beperkende factor vormt. In veel gevallen was nog capaciteit beschikbaar binnen de uitnameteams, terwijl de beschikbare transportteams al volledig waren ingepland. Hierdoor konden extra donoren niet meer tijdig worden bereikt of vervoerd.

Figuur 5 ondersteunt deze observatie. Naarmate het aantal geaccepteerde donoren per dag toeneemt, blijft het aantal verwerkte donoren achter bij de theoretische situatie waarin alle donoren kunnen worden verwerkt. Dit wijst op een capaciteitsplafond binnen het volledig centrale scenario met de gekozen acht transportteams.

Deze resultaten verklaren waarom het volledig centrale scenario aanzienlijk meer niet-verwerkte



Figuur 4: Geografische spreiding van niet-verwerkte donoren in het volledig centrale scenario. De grootte van de cirkels is evenredig aan het aantal niet-verwerkte donoren op de betreffende donoorlocatie.



Figuur 5: Relatie tussen het dagelijkse donorvolume en het aantal verwerkte donoren in het volledig centrale scenario. De grootte van de cirkel en het getal in de cirkel geven het aantal dagen weer waarop de betreffende combinatie voorkwam. De rode stippellijn geeft de situaties weer waarin alle aangeboden donoren worden verwerkt.

donoren heeft dan het gedeeltelijk centrale scenario, ondanks een vergelijkbare beschikbaarheid van uitnameteams. Vooral op drukke dagen lijken de acht beschikbare transportteams onvoldoende capaciteit te bieden om alle donoren binnen de gestelde tijdsvensters te verwerken. Hierdoor vormt transportcapaciteit de grootste beperking binnen het volledig centrale scenario.

Samenvattend blijkt dat alle drie de modellen voor het overgrote deel van de donoren een toelaatbare planning kunnen vinden. Het gedeeltelijk centrale scenario behaalt daarbij het hoogste verwerkingspercentage, terwijl het volledig centrale scenario duidelijk wordt beperkt door de beschikbare transportcapaciteit. Voor donoren van type 4 vormt daarnaast in alle drie de scenario's de beschikbare botteamcapaciteit een belangrijke beperkende factor.

5.2 Vergelijking van de MILP-modellen

In deze paragraaf worden de resultaten van de drie MILP-modellen in meer detail met elkaar vergeleken, met name de personeelsuren.

5.2.1 Donorverzameling

Om de totale personeelsinzet van de verschillende organisatiemodellen eerlijk te kunnen vergelijken, moeten verschillen als gevolg van niet-verwerkte donoren worden uitgesloten. Daarom zijn in deze paragraaf uitsluitend dagen meegenomen waarop de drie modellen niet alleen hetzelfde aantal donoren verwerkten, maar ook exact dezelfde donoren wel of niet verwerkt werden. Van de 730 berekende dagen voldeden 587 dagen aan deze voorwaarde.

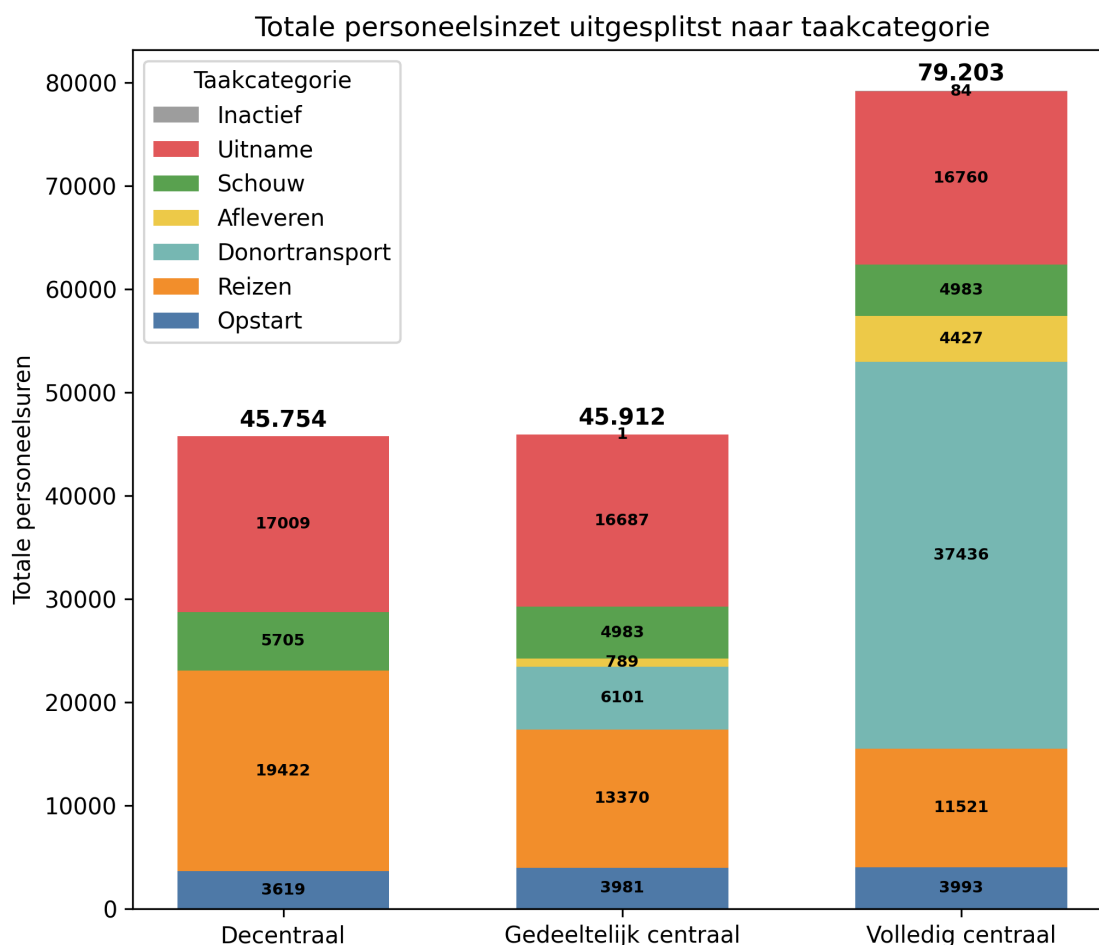
Binnen deze verzameling dagen waren in de drie scenario's 4990 geaccepteerde donoren aanwezig, waarvan 4983 werden verwerkt (99,9%). De verdeling van de 4983 verwerkte donoren over de acceptatieniveaus was als volgt: 3799 donoren in niveau 1 (cornea), 769 in niveau 2 (huid), 178 in niveau 3 (hartklep) en 237 in niveau 4 (bot). De aantallen beschikbare en uitgenomen weefsels waren identiek tussen de scenario's: 4233 van de 4236 beschikbare cornea, 530 van de 531 huidweefsels, 223 van de 228 hartkleppen en 164 van de 171 botweefsels werden uitgenomen. Van de 4983 verwerkte donoren bleken er bij 556 (11,2%) na de schouw en bloedafname uiteindelijk geen geschikte weefsels voor uitname beschikbaar te zijn.

Kenmerk	Waarde
Berekende dagen	730
Vergelijkbare dagen	587
Geaccepteerde donoren	4990
Verwerkte donoren	4983
Niet-verwerkte donoren	7
Schouw-only donoren	556

Tabel 9: Samenstelling van de donorverzameling die voor alle drie scenario's identiek was en daarom voor de vergelijking is gebruikt.

5.2.2 Totale personeelsinzet

Uit de modeloplossingen kan voor iedere dag worden berekend hoeveel personeelsuren nodig zijn en hoe deze uren over de verschillende werkzaamheden zijn verdeeld. Figuur 6 toont de totale personeelsinzet over alle 587 vergelijkbare dagen, uitgesplitst naar taakcategorie. Het decentrale model en het gedeeltelijk centrale model vereisen vrijwel dezelfde totale personeelsinzet, met respectievelijk 45.755 en 45.913 personeelsuren. Het volledig centrale model vraagt daarentegen aanzienlijk meer capaciteit: in totaal waren 79.203 personeelsuren nodig. Dit komt neer op een stijging van 73% ten opzichte van het decentrale model. Hoewel de totale personeelsinzet van het decentrale en gedeeltelijk centrale model vrijwel gelijk is, verschilt de verdeling van de personeelsuren over de verschillende werkzaamheden zichtbaar tussen de scenario's.



Figuur 6: Totale personeelsinzet voor het decentrale, gedeeltelijk centrale en volledig centrale model, uitgesplitst naar taakcategorie. De getallen binnen de staven geven het aantal personeelsuren per taakcategorie weer. De getallen boven de staven tonen het totaal aantal personeelsuren per scenario.

Figuur 6 laat zien dat de personeelsuren voor reizen, schouw en uitname afnemen in de centrale modellen. De afname in reistijd wordt deels veroorzaakt doordat alle verplaatsingen plaatsvinden met tweepersoonsteams, terwijl in het decentrale model ook grotere teams reizen. De afname in schouw- en uitname-uren wordt veroorzaakt doordat de schouw altijd door een tweepersoonsteam

wordt uitgevoerd en doordat na de schouw soms een kleiner uitnameteam volstaat wanneer het hoogst geaccepteerde weefsel uiteindelijk niet geschikt blijkt voor uitname.

Tegenover deze besparingen staan in de centrale modellen de extra werkzaamheden voor donortransport en het afleveren van donoren. Donortransport is de reistijd die hoort bij de transporttaken: reizen naar een donor of het uitnamecentrum, en vervolgens de donor vervoeren. In het gedeeltelijk centrale model worden deze extra werkzaamheden grotendeels gecompenseerd door de genoemde besparingen, waardoor de totale personeelsinzet vrijwel gelijk blijft aan die van het decentrale model. In het volledig centrale model is dit niet het geval: de benodigde donortransporten nemen daar sterk toe en vormen de belangrijkste oorzaak van de sterke stijging van de totale personeelsinzet. Daarnaast bevatten de centrale modellen een kleine hoeveelheid inactieve tijd (1 personeelsuur voor het gedeeltelijk centrale model en 84 personeelsuren voor het volledig centrale model), bestaande uit perioden tussen opeenvolgende donoren waarin een team tijdelijk geen werkzaamheden uitvoert.

De centrale modellen hebben meer opstarttijd dan het decentrale model, omdat werkzaamheden over meerdere gespecialiseerde teams worden verdeeld en daardoor meer shifts nodig zijn. Tabel 10 geeft enkele kenmerken van de gebruikte shifts voor de drie scenario's weer.

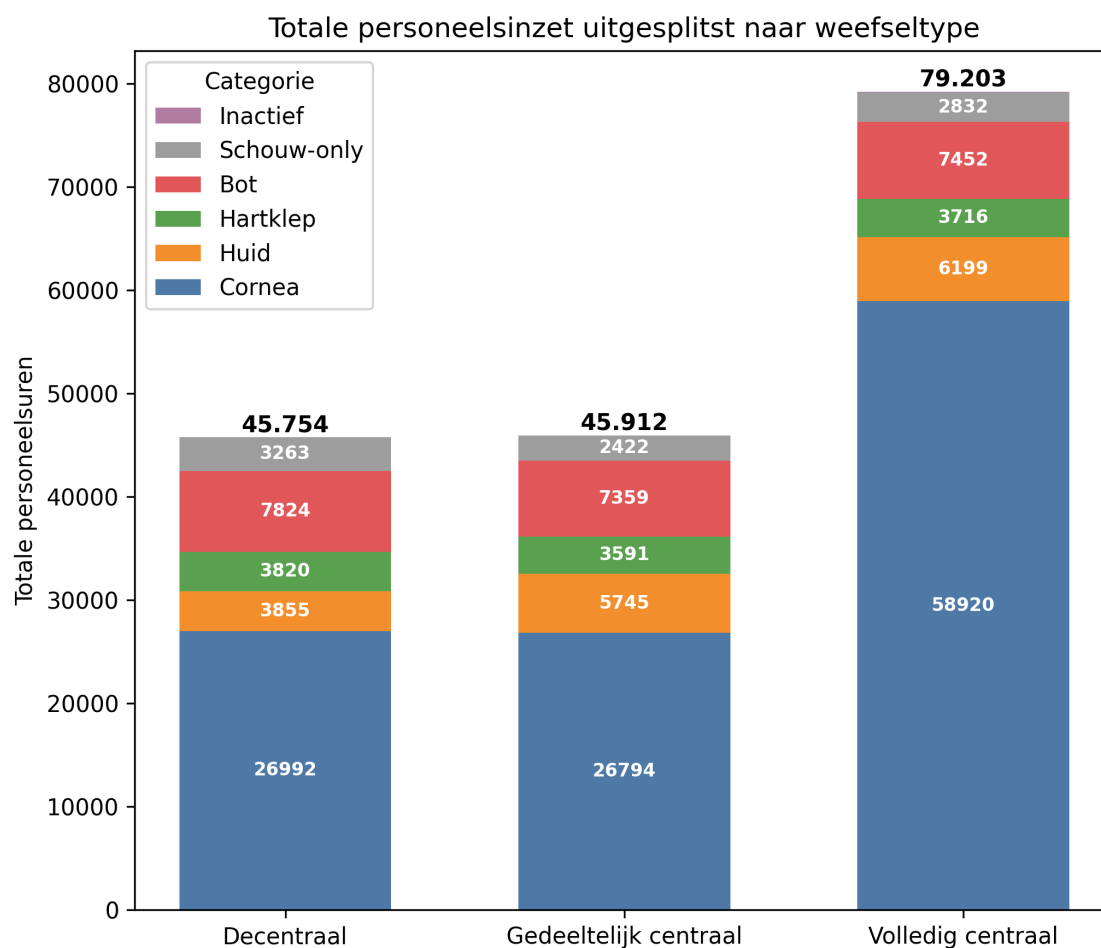
Kenmerk	Decentraal	Gedeeltelijk centraal	Volledig centraal
Gemiddeld aantal shifts per dag	3,95	5,14	12,08
Standaarddeviatie shifts per dag	1,13	1,89	3,44
Gemiddelde shiftduur (uur)	7,41	6,49	5,11
Gemiddelde duur kortste shift (uur)	4,87	3,50	1,71
Gemiddelde duur langste shift (uur)	9,66	8,88	8,43
Gemiddelde bezettingsgraad (%)	100,00	100,00	99,93

Tabel 10: Vergelijking van het gebruik van shifts tussen het decentrale, gedeeltelijk centrale en volledig centrale model. De shiftduren zijn uitgedrukt in uren.

Tabel 10 laat zien dat het decentrale model gemiddeld het laagste aantal shifts per dag gebruikt (3,95), terwijl deze shifts gemiddeld het langst duren (7,41 uur). Het volledig centrale model gebruikt daarentegen gemiddeld 12,08 shifts per dag, waarbij de shifts gemiddeld 5,11 uur duren. Het gedeeltelijk centrale model ligt voor beide kenmerken ertussenin. Hetzelfde patroon is zichtbaar voor zowel de gemiddelde kortste als de gemiddelde langste shift per dag. Het grotere aantal shifts bij centralisatie wordt deels verklaard doordat (sommige) donoren door meerdere teams worden behandeld. Bij volledige centralisatie speelt de langere transporttijd ook een grote rol, omdat daardoor minder donoren in een shift passen. De gemiddelde bezettingsgraad, gedefinieerd als het aandeel van de shifttijd dat niet inactief is, ligt in alle scenario's vrijwel op 100%.

Naast de verdeling van de personeelsuren naar taakcategorieën is het ook relevant om te bekijken hoe deze uren over de verschillende weefseltypen zijn verdeeld. Figuur 7 toont dezelfde totale personeelsuren als Figuur 6, maar verdeelt deze over de verschillende weefseltypen. Omdat in alle drie scenario's exact dezelfde donoren en weefsels zijn verwerkt, kunnen de waargenomen verschillen volledig worden toegeschreven aan verschillen in de organisatie van het proces en niet aan verschillen in de donorverzameling.

De verdeling van de personeelsuren over de verschillende weefseltypen verschilt zichtbaar tussen de scenario's. Het meest opvallende verschil is de sterke toename van de personeelsinzet die aan



Figuur 7: Totale personeelsinzet voor het decentrale, gedeeltelijk centrale en volledig centrale model, uitgesplitst naar weefseltype. Naast de vier uitgenomen weefseltypen worden ook aparte categorieën weergegeven voor donoren waarbij na de schouw geen geschikt weefsel voor uitname beschikbaar bleek (schouw-only) en voor inactieve tijd. De getallen binnen de staven geven het aantal personeelsuren per categorie weer. De getallen boven de staven tonen het totaal aantal personeelsuren per scenario.

cornea wordt toegeschreven in het volledig centrale model. Deze categorie levert daarmee de grootste bijdrage aan de hogere totale personeelsinzet van dit scenario. Voor de overige weefseltypen zijn de verschillen aanzienlijk kleiner.

In Paragraaf 5.2.4 wordt per weefseltype nader onderzocht hoe de werkbelasting tussen de scenario's verschilt. Daarbij wordt tevens toegelicht hoe personeelsuren van gedeelde werkzaamheden, zoals opstarttijd, reizen en donortransport, worden toegerekend aan de verschillende donoren en weefsels.

5.2.3 Werkbelasting per dag

Om de werkbelasting van de drie organisatiemodellen te vergelijken, is voor iedere dag het totale aantal benodigde personeelsuren bepaald. Vervolgens zijn de verdelingen van deze dagelijkse werkbelasting en de verschillen tussen scenario's statistisch geanalyseerd. Tabel 11 toont enkele beschrijvende statistieken van de resulterende dagelijkse personeelsinzet.

Scenario	Gemiddelde	SD	Mediaan	Minimum	Maximum
Decentraal	77,95	40,93	67,19	9,99	266,34
Gedeeltelijk centraal	78,22	38,95	71,46	9,65	262,95
Volledig centraal	134,93	51,06	134,49	14,21	333,56

Tabel 11: Beschrijvende statistieken van de dagelijkse personeelsuren voor de drie scenario's. SD staat voor standaarddeviatie.

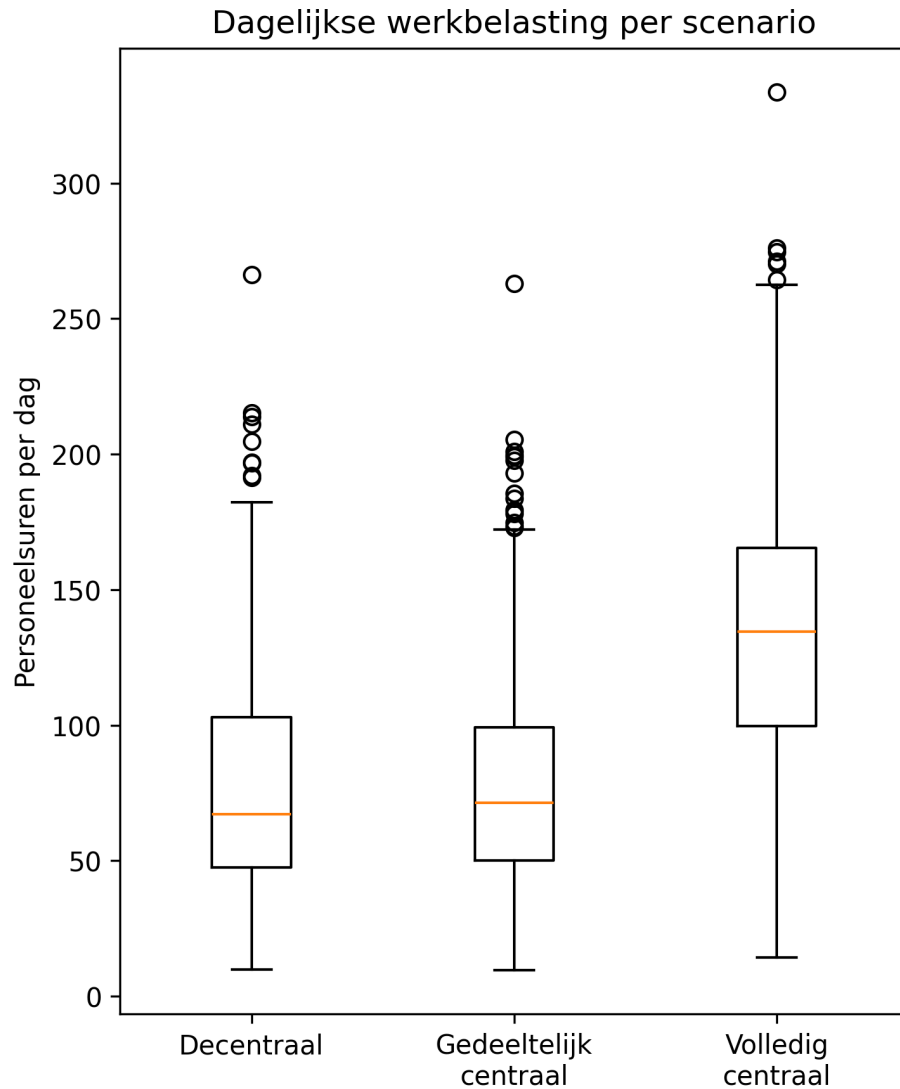
De gemiddelde dagelijkse werkbelasting bedraagt 77,95 personeelsuren voor het decentrale model en 78,22 personeelsuren voor het gedeeltelijk centrale model. Deze waarden liggen zeer dicht bij elkaar. Het volledig centrale model vereist gemiddeld 134,93 personeelsuren per dag en heeft daarmee een substantieel hogere werkbelasting dan de andere twee scenario's. Ook de mediaan en het maximum van de dagelijkse werkbelasting liggen voor dit scenario aanzienlijk hoger.

Figuur 8 toont de verdeling van de dagelijkse werkbelasting. De oranje lijn in de box geeft de mediaan weer en de box bevat de middelste 50% van de waarnemingen. De lijntjes buiten de box ('whiskers') lopen tot de meest extreme waarnemingen die binnen 1,5 maal de interkwartielafstand (lengte van de box) van de box liggen. Waarnemingen daarbuiten worden als uitschieters weergegeven. De boxplots van het decentrale en gedeeltelijk centrale model overlappen grotendeels, terwijl de verdeling van het volledig centrale model duidelijk naar hogere waarden verschoven is. Dit beeld komt overeen met de gemiddelde waarden in Tabel 11.

Omdat in alle scenario's dezelfde 587 dagen worden vergeleken, zijn gepaarde t-toetsen gebruikt om verschillen in dagelijkse werkbelasting te evalueren. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 12.

Tabel 12 laat zien dat er geen statistisch significant verschil bestaat tussen het decentrale en gedeeltelijk centrale model ($p = 0,597$). Het gemiddelde verschil bedraagt slechts 0,27 personeelsuren per dag en het 95%-betrouwbaarheidsinterval bevat nul.

Het volledig centrale model verschilt daarentegen statistisch significant van zowel het decentrale als het gedeeltelijk centrale model ($p < 0,001$). Ten opzichte van beide scenario's zijn gemiddeld circa 57 extra personeelsuren per dag nodig. De bijbehorende betrouwbaarheidsintervallen liggen volledig boven nul.



Figuur 8: Verdeling van de dagelijkse werkbelasting voor het decentrale, gedeeltelijk centrale en volledig centrale model.

Vergelijking	Gemiddeld verschil (uur per dag)	95%- betrouwbaarheids- interval	<i>p</i> - waarde
Gedeeltelijk centraal – Decentraal	0,27	[-0,73 ; 1,27]	0,597
Volledig centraal – Decentraal	56,98	[54,76 ; 59,21]	< 0,001
Volledig centraal – Gedeeltelijk centraal	56,71	[54,62 ; 58,81]	< 0,001

Tabel 12: Resultaten van gepaarde t-toetsen voor verschillen in dagelijkse personeelsuren tussen scenario's.

5.2.4 Analyse per weefseltype

Om inzicht te krijgen in de gevolgen van centralisatie voor de verschillende soorten uitnames, zijn de gemiddelde personeelsuren per uitgenomen weefsel berekend. Hierbij worden de personeelsuren van de shifts waarin een donor wordt behandeld toegerekend aan de uitgenomen weefsels van die donor. Naast de vier weefseltypen wordt ook de categorie ‘schouw-only’ beschouwd. Dit betreft donoren waarvoor na de schouw geen geschikt weefsel voor uitname beschikbaar bleek.

Voor de drie modellen wordt de werkbelasting per uitgenomen weefsel afgeleid uit de oplossing van het model. Daarbij wordt de totale werkbelasting van de shifts waarin een donor wordt behandeld, verdeeld over de betrokken donoren en de uitgenomen weefsels van die donoren.

De werkbelasting kan bestaan uit zes componenten: opstarttijd, reistijd van uitnameteams, donortransporttijd, tijd voor het ophalen of afleveren van een donor, schouwtijd en uitnameduur. Niet iedere component komt in ieder model voor. In het decentrale model vinden geen donortransporten plaats, en daar worden dus ook geen donoren opgehaald of afgeleverd.

De uitnameduur behorend bij een donor is opgebouwd uit de vaste uitnametijden van de weefsels die bij die donor worden uitgenomen. Wanneer bij een donor meerdere weefsels worden uitgenomen, wordt de totale uitnameduur verdeeld op basis van de standaard uitnametijden van de betrokken weefsels.

De schouwtijd en eventuele donoraflevertijd van een donor worden gelijk verdeeld over de uitgenomen weefsels van die donor.

De totale reistijd van een shift, inclusief eventuele donortransporttijd, wordt eerst gelijk verdeeld over de donoren binnen die shift en vervolgens gelijk verdeeld over de uitgenomen weefsels van iedere donor. Hiervoor is gekozen zodat de reistijd eerlijker over de donoren of weefsels wordt verdeeld dan door bijvoorbeeld de heenreis naar een donor geheel aan die donor toe te schrijven. In het geval dat er twee donoren dicht bij elkaar worden bezocht, zou één van hen dan mogelijk een veel grotere reistijd hebben. De reden om de reistijd en transporttijd bij elkaar te nemen, is omdat ze moeilijk te scheiden zijn. Neem bijvoorbeeld het geval dat een team eerst een donor naar Groningen terugbrengt, dan een andere donor op dezelfde locatie behandelt, en ten slotte naar Assen rijdt voor een andere donor die naar het uitnamecentrum moet worden gebracht. In dit geval valt de tijd van de hele route onder de categorie donortransport, terwijl de tweede donor er ook gebruik van had gemaakt. Er zijn ook situaties waar gekozen methode juist niet eerlijk is. Een mogelijke verbetering voor toekomstig onderzoek zou zijn om de reistijd proportioneel te verdelen op basis van de hemelsbrede afstanden tussen de donorlocaties en het uitnamecentrum.

De opstarttijd van een shift wordt gelijk verdeeld over alle uitgenomen weefsels van de donoren binnen die shift. Ten slotte worden alle taakuren vermenigvuldigd met de grootte van het ingezette team, zodat personeelsuren worden verkregen.

Een donor waarvoor na de schouw geen weefsels geschikt blijken voor uitname wordt behandeld als een afzonderlijke categorie (*schouw-only*). Voor deze donoren wordt een fictief weefseltype gedefinieerd met een uitnameduur van nul. Hierdoor ontvangen deze donoren wel een aandeel van de opstarttijd, reistijd, donortransport en schouwtijd, maar geen aandeel van de uitnameduur.

Voor een weefsel w van donor d wordt de totale werkbelasting berekend door de bijdragen van alle shifts waarin de donor voorkomt op te tellen. De bijdrage van shift s aan de werkbelasting K_{dws} van weefsel w van donor d wordt gegeven door

$$K_{dws} = \frac{S_{ds}}{n_d} + \frac{D_{ds}}{n_d} + P_{ds}u_w + \frac{R_s + T_s}{N_s n_d} + \frac{O_s}{M_s},$$

waarbij:

- S_{ds} de schouwtijd van donor d in shift s is;
- n_d het aantal uitgenomen weefsels van donor d is;
- D_{ds} de tijd besteed aan het ophalen of afleveren van donor d in shift s is;
- P_{ds} gelijk aan 1 is als de uitname van donor d in shift s plaatsvindt, anders 0;
- u_w de standaard uitnameduur van weefseltype w is;
- R_s de reistijd van uitnameteams in shift s is;
- T_s de donortransporttijd in shift s is;
- N_s het aantal donoren in shift s is;
- O_s de opstarttijd van shift s is;
- M_s het totaal aantal beschikbare weefsels van de donoren behandeld of bezocht in shift s is.

De totale werkbelasting van weefsel w van donor d wordt vervolgens berekend als

$$K_{dw} = \sum_{s \in S_d} K_{dws}, \quad (1)$$

waarbij S_d de verzameling shifts voorstelt waarin donor d wordt behandeld (vervoer of uitname).

In het decentrale model wordt iedere donor d volledig binnen één shift behandeld. Hierdoor bevat S_d slechts één shift. Daarnaast geldt $D_{ds} = 0$ en $T_s = 0$ voor alle shifts s , omdat er geen donortransport plaatsvindt. De bovenstaande formulering reduceert daarmee automatisch tot de berekening voor het decentrale model. In de gedeeltelijk en volledig centrale modellen kan een donor daarentegen in meerdere shifts voorkomen, waardoor de bijdragen uit meerdere shifts worden gesommeerd.

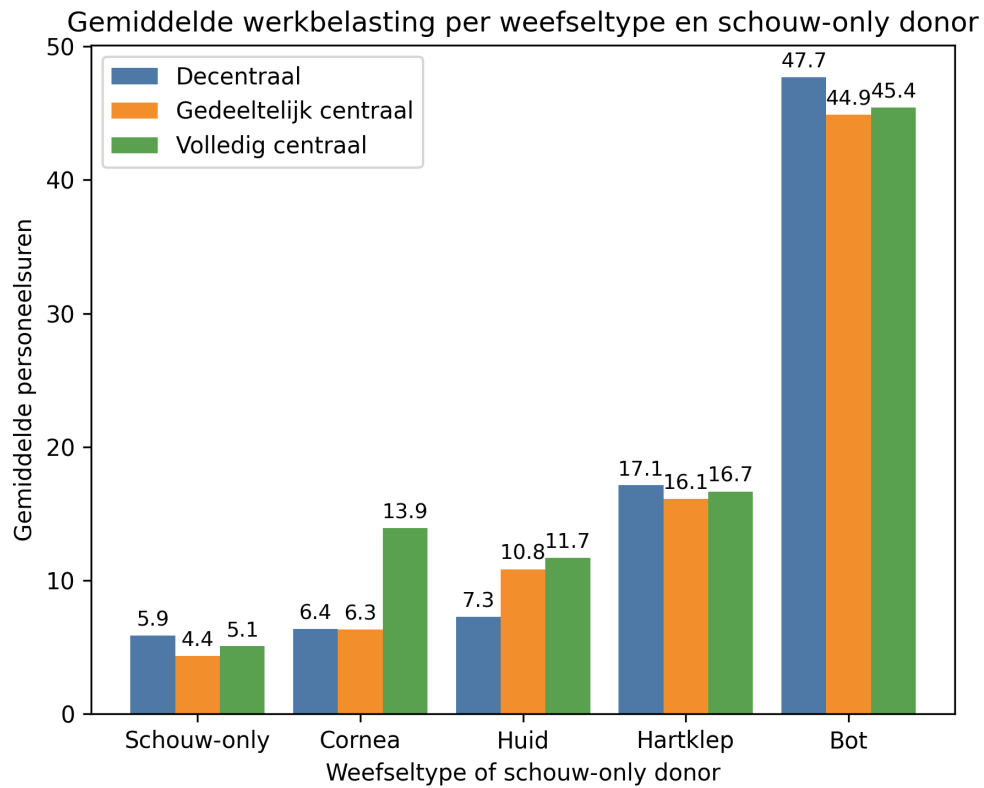
De gemiddelde werkbelasting per uitgenomen weefsel is weergegeven in Figuur 9. Naast de vier onderzochte weefseltypen is ook de categorie *schouw-only* opgenomen.

Figuur 9 laat zien dat de effecten van centralisatie sterk verschillen per weefseltype. Het gedeeltelijk centrale model presteert in alle gevallen beter dan het volledig centrale model. Een verklaring hiervoor wordt gegeven in Paragraaf 5.2.6. De verschillen tussen beide centrale scenario's zijn doorgaans beperkt, met uitzondering van cornea-uitnames, waarvoor het volledig centrale model meer dan tweemaal zoveel personeelsuren vereist als het gedeeltelijk centrale model.

Voor de categorie *schouw-only* is de werkbelasting het hoogst in het decentrale model. Dit kan worden verklaard doordat in het decentrale model soms een 4- of 6-persoons uitnameteam wordt ingezet voor een donor waarbij uiteindelijk geen weefsels worden uitgenomen. In de centrale modellen wordt deze situatie efficiënter afgehandeld, waarbij alle werkzaamheden voor deze donoren door teams van twee personen worden uitgevoerd.

Voor cornea-uitnames zijn het decentrale en gedeeltelijk centrale model vrijwel identiek (6,38 versus 6,33 personeelsuren per cornea). Dit resultaat is gezien de modelopzet niet verrassend, aangezien de werkwijze voor cornea-uitnames in beide scenario's nagenoeg gelijk is. Het volledig centrale model vereist daarentegen gemiddeld 13,92 personeelsuren per cornea-uitname en is daarmee meer dan tweemaal zo arbeidsintensief.

Voor huiduitnames presteren beide centrale modellen duidelijk minder gunstig dan het decentrale model. De gemiddelde werkbelasting stijgt van 7,27 personeelsuren in het decentrale model naar respectievelijk 10,84 en 11,70 personeelsuren in het gedeeltelijk en volledig centrale model. Omdat huiduitnames in alle scenario's door een team van twee personen worden uitgevoerd, levert centralisatie geen besparing in personeelsinzet op, omdat de teamgrootte ongewijzigd blijft. De extra donortransporten zorgen daarom voor een netto toename van de werkbelasting.



Figuur 9: Gemiddelde personeelsuren per uitgenomen weefsel en per schouw-only donor voor het decentrale (D), gedeeltelijk centrale (GC) en volledig centrale (VC) model. De getallen boven de staven geven het gemiddelde aantal personeelsuren per weefsel of donor weer.

Voor hartkleppen zijn de verschillen tussen de scenario's beperkt. In de centrale modellen worden reistijd en schouw uitgevoerd door een kleiner team, terwijl tegelijkertijd donortransporten nodig zijn. Deze effecten compenseren elkaar grotendeels, waardoor de gemiddelde werkbelasting rond de 16 tot 17 personeelsuren per hartklepuitname blijft.

Bij botuitnames zijn de centrale modellen juist licht gunstiger dan het decentrale model. De gemiddelde werkbelasting daalt van 47,71 personeelsuren naar circa 45 personeelsuren per uitname. Voor deze uitnames weegt de besparing doordat reistijd en schouw door een team van twee personen worden uitgevoerd in plaats van door een team van zes personen zwaarder dan de extra personeelsinzet die nodig is voor donortransport.

Deze interpretaties worden verder ondersteund door de analyse per donortype in Paragraaf 5.2.5, waarin de bijdrage van afzonderlijke taakcategorieën aan de totale werkbelasting wordt uitgesplitst.

De exacte waarden en de procentuele verschillen ten opzichte van het decentrale model zijn weergegeven in Tabel 13.

Weefsel	D	GC	VC	GC t.o.v. D	VC t.o.v. D
Schouw-only	5,87	4,36	5,09	-25,8%	-13,2%
Cornea	6,38	6,33	13,92	-0,7%	+118,3%
Huid	7,27	10,84	11,70	+49,0%	+60,8%
Hartklep	17,13	16,10	16,66	-6,0%	-2,7%
Bot	47,71	44,87	45,44	-5,9%	-4,8%

Tabel 13: Gemiddelde personeelsuren per weefseltype en procentueel verschil ten opzichte van het decentrale model. Hierbij staat D voor het decentrale model, GC voor het gedeeltelijk centrale model en VC voor het volledig centrale model.

De in Tabel 13 gerapporteerde uren omvatten uitsluitend tijd die aan specifieke donoren en weefsels kan worden toegerekend. Niet-productieve tijd binnen shifts (inactieve tijd) is hierin niet opgenomen. Daardoor komt de som van de uren in deze tabel overeen met de totale werkbelasting exclusief inactieve tijd.

5.2.5 Analyse per donortype

De totale werkbelasting kan ook worden uitgesplitst naar donortype. Hierbij wordt voor ieder donortype bepaald hoeveel personeelsuren gemiddeld aan de verschillende taakcategorieën worden besteed.

De weergegeven werkbelasting per donor bestaat uit de directe werkzaamheden van de donor (schouw, uitname indien van toepassing en eventueel afleveren), aangevuld met een evenredig aandeel van de gezamenlijke werkzaamheden binnen dezelfde shift, zoals opstarttijd, reizen en donortransport. Voor iedere shift worden deze gezamenlijke werkzaamheden gelijk verdeeld over alle donoren die in die shift zijn ingepland. Wanneer een donor in meerdere shifts voorkomt, bijvoorbeeld doordat schouw, donortransport en uitname door verschillende teams worden uitgevoerd, ontvangt de donor een aandeel van de gezamenlijke werkzaamheden van iedere betrokken shift. De totale werkbelasting van een donor wordt vervolgens verkregen door alle bijdragen uit de verschillende shifts op te tellen en om te rekenen naar personeelsuren op basis van de grootte van de betrokken teams. De gemiddelde werkbelasting per donortype wordt vervolgens berekend als het gemiddelde van deze donor-specifieke personeelsuren over alle donoren van hetzelfde type.

Bij de interpretatie van deze resultaten is enige voorzichtigheid nodig. In het decentrale model wordt het donortype bepaald op basis van het acceptatieniveau van de donor: het hoogst geaccepteerde weefsel voorafgaand aan de schouw bepaalt welk team wordt ingezet. In de centrale modellen wordt het donortype daarentegen bepaald op basis van het explantatieniveau: het hoogst beschikbare weefsel na schouw en bloedafname bepaalt welk uitnameteam nodig is. Hierdoor bevatten overeenkomstig genummerde typen niet noodzakelijk dezelfde donoren en zijn de resultaten niet volledig rechtstreeks vergelijkbaar.

Figuur 10 laat voor de drie scenario's de gemiddelde personeelsuren per donor zien, uitgesplitst naar taakcategorie. Tabel 14 bevat de bijbehorende getallen.

Binnen de centrale modellen is het gedeeltelijk centrale model voor alle explantatietypen (ET) efficiënter dan het volledig centrale model, zie Paragraaf 5.2.6 voor een verklaring. Voor ET0, ET2, ET3 en ET4 zijn de verschillen relatief beperkt, terwijl voor ET1 (donoren waarbij uitsluitend cornea wordt uitgenomen) een veel groter verschil zichtbaar is. De gemiddelde werkbelasting stijgt van 5,94 personeelsuren per donor in het gedeeltelijk centrale model naar 14,66 personeelsuren per donor in het volledig centrale model. Dit verschil wordt grotendeels veroorzaakt door de toevoeging van donortransport en aflevering voor dit type donor in het volledig centrale model.

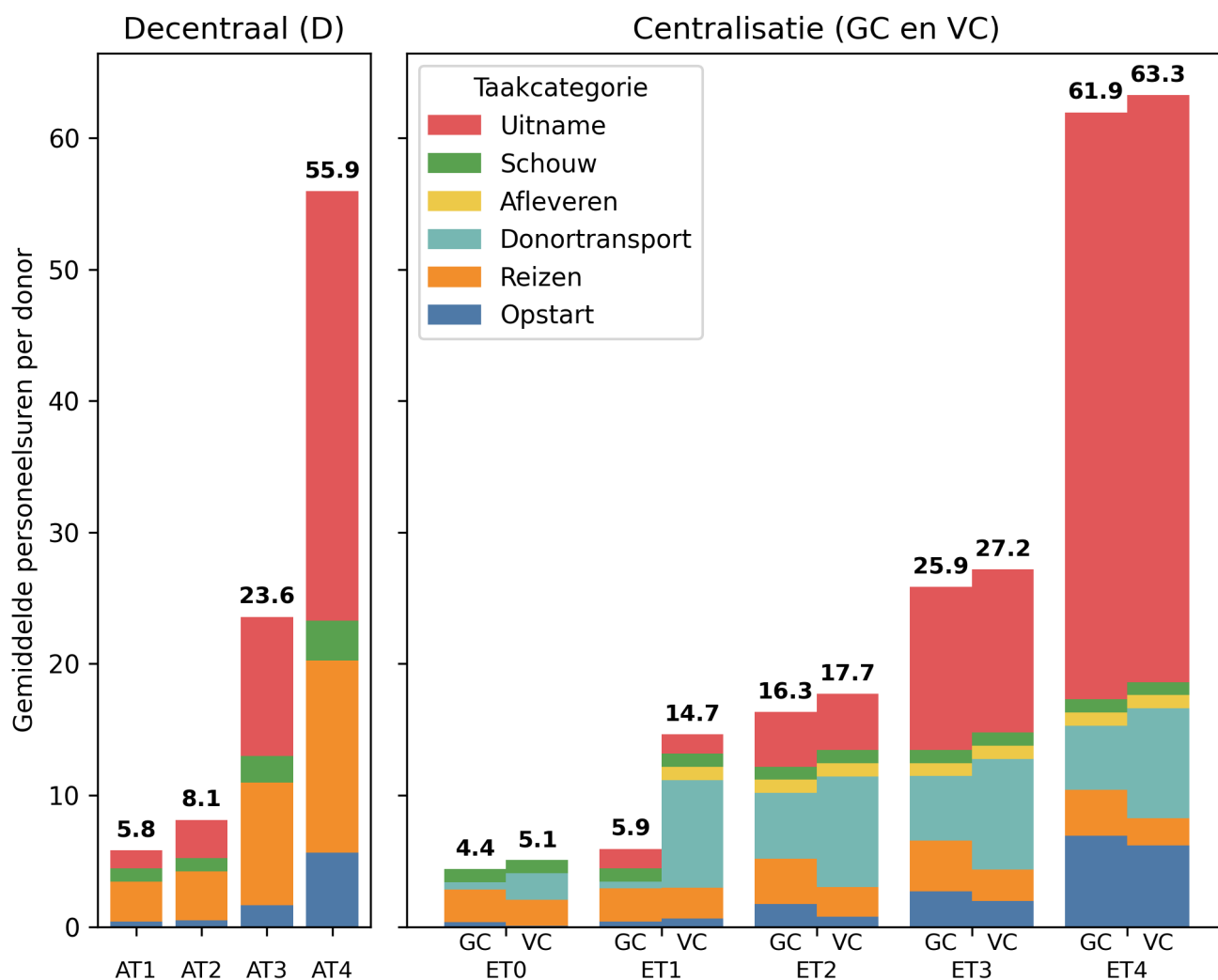
De werkbelasting voor schouw en aflevering (waar van toepassing) is binnen de centrale modellen per donortype hetzelfde. Ook de uitnameduur verschilt nauwelijks tussen beide modellen. Alleen voor ET2 wordt een klein verschil in uitnameduur waargenomen. Dit lijkt het gevolg van incidentele situaties waarin een donor door een team met een hoger specialisatieniveau werd behandeld dan strikt noodzakelijk was.

Ook voor de reisgerelateerde werkzaamheden is een duidelijk patroon zichtbaar. De som van reistijd en donortransport is voor alle explantatietypen lager in het gedeeltelijk centrale model dan in het volledig centrale model. Dit resultaat past bij de verwachting dat in het gedeeltelijk centrale model vaker routecombinaties mogelijk zijn, waardoor de reisgerelateerde werkzaamheden efficiënter kunnen worden uitgevoerd. Het grotere aandeel donortransport bij het volledig centrale model wordt veroorzaakt doordat donortransporten minder vaak in combinatie met niet-transporttaken in een route worden gecombineerd. Hierdoor wordt een kleiner gedeelte van die routes toegeschreven aan de gewone reistijd. De opstarttijd is voor de meeste explantatietypen iets lager in het volledig centrale model. Dit hangt samen met het gebruik van transportteams, waarvoor in dit scenario een kortere opstarttijd is aangenomen dan voor de cornea-/transportteams in het gedeeltelijk centrale model.

Binnen zowel het decentrale als de centrale modellen neemt de totale werkbelasting toe naarmate een donor meer gespecialiseerde weefsels doneert. Naast de uitnametijd liggen vooral de reistijd en schouwtijd voor AT3 en AT4 aanzienlijk hoger dan voor de lagere acceptatietypes (AT). Dit komt doordat deze werkzaamheden worden uitgevoerd door grotere teams. In de centrale modellen worden schouw en transport daarentegen altijd uitgevoerd door tweepersoonsteams, waardoor deze onderdelen veel minder afhankelijk zijn van het donor- of weefseltype.

De uitname-uren van de acceptatietypen in het decentrale model kunnen niet rechtstreeks worden vergeleken met die van de explantatietypen in de centrale modellen. Binnen een acceptatietype worden namelijk ook donoren meegenomen van wie na de schouw niet alle vooraf geaccepteerde weefsels daadwerkelijk geschikt blijken voor uitname. Hierdoor is de gemiddelde uitnameduur van de hogere acceptatietypen in het decentrale model lager. Om deze reden werd in de vorige paragraaf een vergelijking gemaakt op basis van uitgenomen weefseltypen, die wel rechtstreeks tussen de scenario's vergelijkbaar zijn.

Werkbelasting per donortype



Figuur 10: Gemiddelde personeelsuren per donor, uitgesplitst naar donortype en taakcategorie voor het decentrale model (links) en de centrale modellen (rechts). De getallen boven de staven geven het totaal aantal personeelsuren per donor weer. In het linker paneel zijn de acceptatie-donortypen (AT1-AT4) weergegeven zoals gebruikt in het decentrale model. In het rechter paneel zijn de explantatie-donortypen (ET0-ET4) weergegeven voor het gedeeltelijk centrale (GC) en volledig centrale (VC) model. ET0 betreft donoren waarbij na de schouw geen geschikt weefsel voor uitname beschikbaar bleek.

Type	Scenario	Opstart	Reizen	Donortransport	Afleveren	Schouw	Uitname	Totaal
AT1	D	0,42	3,01	–	–	1,01	1,36	5,80
AT2	D	0,49	3,72	–	–	1,03	2,90	8,13
AT3	D	1,64	9,32	–	–	2,04	10,56	23,57
AT4	D	5,63	14,64	–	–	3,00	32,67	55,94
ET0	GC	0,35	2,47	0,57	0,00	1,00	0,00	4,39
ET0	VC	0,09	1,99	2,03	0,00	1,00	0,00	5,10
ET1	GC	0,39	2,53	0,52	0,00	1,00	1,50	5,94
ET1	VC	0,62	2,38	8,16	1,00	1,00	1,50	14,66
ET2	GC	1,76	3,45	4,98	1,00	1,00	4,17	16,35
ET2	VC	0,78	2,26	8,40	1,00	1,00	4,30	17,75
ET3	GC	2,70	3,84	4,92	1,00	1,00	12,40	25,86
ET3	VC	1,96	2,39	8,43	1,00	1,00	12,40	27,19
ET4	GC	6,93	3,49	4,87	1,00	1,00	44,65	61,94
ET4	VC	6,20	2,09	8,34	1,00	1,00	44,65	63,27

Tabel 14: Getallen behorend bij Figuur 10: gemiddelde personeelsuren per donor naar donortype en taakcategorie voor het decentrale (D), gedeeltelijk centrale (GC) en volledig centrale (VC) model.

5.2.6 Reistijdanalyse

De resultaten uit Paragraaf 5.1 suggereren dat met name in het volledig centrale model de beschikbare transportcapaciteit een belangrijke beperking is. Om deze bevinding beter te begrijpen, is onderzocht in hoeverre routecombinaties de benodigde reistijd kunnen reduceren.

Voor ieder scenario is de gerealiseerde reistijd per donor vergeleken met een hypothetische situatie waarin iedere donor afzonderlijk zou worden bezocht. Hierbij wordt gebruikgemaakt van auto-uren in plaats van personeelsuren. De gerealiseerde reistijd per donor is berekend door de totale reistijd van een shift, inclusief donortransporten indien van toepassing, gelijkmatig te verdelen over alle donoren die binnen die shift worden bediend. De solo-reistijd van een donor is gedefinieerd als de reistijd die nodig zou zijn wanneer een team uitsluitend die donor bedient en daarna direct terugkeert naar de thuislocatie. De routefactor wordt vervolgens berekend als de verhouding tussen de gerealiseerde reistijd en deze solo-reistijd. Een lagere routefactor duidt op efficiëntere routecombinaties.

Tabel 15 laat zien dat het gedeeltelijk centrale model voor alle explantatietypen de grootste routekorting heeft. Voor ET1 wordt de reistijd met ruim 35% verminderd ten opzichte van de solo-reistijd. Voor ET2 en ET3 bedraagt deze reductie circa 28%, tegenover ongeveer 10 tot 13% in het volledig centrale model. Ook voor ET4 blijft in het gedeeltelijk centrale model een reductie van ruim 20% zichtbaar, terwijl deze in het volledig centrale model vrijwel verdwijnt.

In het gedeeltelijk centrale model kunnen donortransporten en cornea-uitnames regelmatig binnen dezelfde routes worden gecombineerd, waardoor in totaal minder auto-uren nodig zijn. In het volledig centrale model vinden meer afzonderlijke transportbewegingen plaats en zijn de mogelijkheden voor routecombinaties beperkter (binnen een ronde maximaal één donor wegbrengen en één donor

Type	Scenario	Auto-uren	Solo-auto-uren	Routefactor
AT1	D	1,51	2,23	0,68
AT2	D	1,86	2,72	0,68
AT3	D	2,33	2,79	0,83
AT4	D	2,44	2,53	0,96
ET1	GC	1,52	2,36	0,65
ET1	VC	5,27	5,93	0,89
ET2	GC	4,21	5,84	0,72
ET2	VC	5,33	5,95	0,90
ET3	GC	4,38	6,06	0,72
ET3	VC	5,41	6,19	0,87
ET4	GC	4,18	5,28	0,79
ET4	VC	5,21	5,31	0,98

Tabel 15: Gerealiseerde reistijd, hypothetische solo-reistijd en routefactor per donor(type). Reisuren zijn uitgedrukt in auto-uren. De routefactor is gedefinieerd als de verhouding tussen de gerealiseerde reistijd en de solo-reistijd; lagere waarden duiden op meer routecombinaties.

ophalen, met eventueel tussendoor schouw-only donoren). Hierdoor duren transportbewegingen gemiddeld langer, wat nog meer bijdraagt aan de behoefte aan meer transportcapaciteit.

Binnen het decentrale model neemt de routekorting af naarmate het acceptatietype toeneemt. Opvallend is dat AT1 en AT2 vrijwel dezelfde routefactor hebben. Hoewel de uitnameduur van AT2 gemiddeld iets langer is, worden deze donoren regelmatig gecombineerd met AT1-donoren binnen dezelfde shift. Hierdoor blijft de gerealiseerde routekorting voor beide typen vergelijkbaar. AT1 en AT2 hebben een routefactor van ongeveer 0,68, terwijl deze stijgt naar 0,83 voor AT3 en 0,96 voor AT4. Dit is in lijn met de langere uitnameduren van de hogere acceptatietypen, waardoor minder donoren binnen dezelfde shift kunnen worden gecombineerd. Daarnaast zijn deze teams groter, waardoor het minder wenselijk is om met lagere acceptatietypes te combineren, ook al zou het mogelijk zijn. Met name voor AT4 blijft vaak onvoldoende tijd over om meerdere donoren binnen één route af te handelen, waardoor vrijwel geen routekorting meer wordt gerealiseerd.

De relatief lage solo-reistijd van AT1 kan worden verklaard doordat één van de teams voor dit acceptatietype in Nijmegen is gestationeerd, terwijl de overige teams vanuit Oude Meer opereren. Hierdoor hebben AT1 donoren in het oosten van Nederland gemiddeld een kortere afstand tot hun toegewezen team dan de overige acceptatietypes. De relatief lage solo-reistijd van AT4 lijkt samen te hangen met de selectie van donoren die in deze analyse zijn meegenomen. Zoals beschreven in Paragraaf 5.2.1 zijn uitsluitend donoren beschouwd die in alle vergeleken scenario's konden worden verwerkt. Hierdoor vallen relatief veel verder gelegen botdonoren buiten de analyse, aangezien deze donoren vanwege hun lange uitnameduur en reistijd vaker niet kunnen worden ingepland, zie Paragraaf 5.1. De gemiddelde reisafstand van de overblijvende AT4-donoren valt daardoor lager uit.

Voor ET1 ligt zowel de solo-reistijd als de routefactor in het gedeeltelijk centrale model dicht bij de waarden voor AT1 in het decentrale model. Dit is te verwachten, aangezien de werkwijze voor deze donoren grotendeels overeenkomt en geen afzonderlijk donortransport vereist. Voor de

getransporteerde explantatietypen liggen de solo-reistijden aanzienlijk hoger, rond de 6 auto-uren per donor. Een uitzondering vormt ET4, waarvoor de gemiddelde solo-reistijd lager uitvalt. Ook dit lijkt het gevolg van de donorselectie die in Paragraaf 5.2.1 is beschreven. Botdonoren hebben gemiddeld de langste uitnameduur, waardoor zij relatief vaak afvallen vanwege de capaciteit van het botteam. Daarnaast worden op dagen waarop transportcapaciteit beperkend is eerder donoren geselecteerd die relatief weinig personeelsuren vereisen. Hierdoor vallen met name verder gelegen botdonoren vaker buiten de vergelijking, waardoor de gemiddelde reisafstand van de overblijvende ET4-donoren lager uitvalt. Het is mogelijk dat dit effect groter is bij de solo-auto-uren, waardoor de routefactor opmerkelijk hoog is. Het voordeel van het gemiddeld dichterbij liggen van de botdonoren wordt in de gerealiseerde auto-uren immers gedeeld met eventueel andere donoren in de routes.

Op basis van de geografische spreiding van donoren zou verwacht kunnen worden dat de solo-reistijd van de getransporteerde explantatietypen in de centrale modellen grotendeels vergelijkbaar is. De beperkte verschillen tussen ET2 en ET3 ondersteunen deze verwachting. De verschillen tussen het gedeeltelijk en volledig centrale model kunnen niet veroorzaakt worden door verschillen in donorlocaties, want ze gebruiken dezelfde verzameling donoren. Ze moeten dus veroorzaakt zijn door verschillen in de mogelijkheden om donortransporten en uitnames binnen dezelfde route te combineren. De routefactoren laten zien dat het gedeeltelijk centrale model hierin aanzienlijk efficiënter is dan het volledig centrale model. Dit ondersteunt de bevinding uit Paragraaf 5.1 dat transportcapaciteit de belangrijkste beperking vormt in het volledig centrale model.

5.2.7 Conclusie

De vergelijking van de drie modellen laat zien dat het gedeeltelijk centrale model qua totale personeelsinzet vrijwel gelijkwaardig presteert aan het decentrale model. Over de 587 vergelijkbare dagen is het verschil in gemiddelde dagelijkse werkbelasting slechts 0,27 personeelsuren per dag en is dit verschil niet statistisch significant. Het volledig centrale model vereist daarentegen gemiddeld circa 57 extra personeelsuren per dag en leidt daarmee tot een substantiële toename van de totale werkbelasting.

De effecten van centralisatie verschillen sterk per weefseltype. Voor cornea-uitnames blijkt volledige centralisatie zeer ongunstig: de benodigde personeelsinzet per weefsel neemt meer dan twee keer toe ten opzichte van het decentrale model. Voor huidweefsels leidt centralisatie eveneens tot een duidelijke toename van de werkbelasting. Voor hartkleppen zijn de verschillen tussen de scenario's beperkt, terwijl botweefsels juist enigszins profiteren van centralisatie doordat schouw en reistijd met kleinere teams kunnen worden uitgevoerd.

De analyse van de reistijden laat zien dat de verschillen tussen het gedeeltelijk en volledig centrale model slechts ten dele worden verklaard door het aanvullende vervoer van corneadonoren. Daarnaast speelt de mogelijkheid om routes te combineren een belangrijke rol. In het gedeeltelijk centrale model kunnen donortransporten en cornea-uitnames regelmatig binnen dezelfde route worden gecombineerd, waardoor aanzienlijke reistijdbesparingen worden gemaakt. In het volledig centrale model zijn deze mogelijkheden beperkter, wat resulteert in hogere routefactoren, meer benodigde transportbewegingen en een grotere vraag naar transportcapaciteit.

Samenvattend combineert het gedeeltelijk centrale model de voordelen van centralisatie voor de hogere weefseltypen, zoals de beschikbaarheid van goede faciliteiten, met een vrijwel gelijkblijvende totale personeelsinzet ten opzichte van het decentrale model.

5.3 Simulatie met heuristieken

Naast de MILP-modellen zijn ook simulaties met vier heuristieken geëvalueerd in het decentrale (D) en gedeeltelijk centrale (GC) scenario. Het doel van deze simulaties is om inzicht te krijgen in de prestaties van relatief eenvoudige planningsmethoden zonder gebruik van toekomstige informatie, en om te onderzoeken in hoeverre deze de resultaten van de optimalisatiemodellen kunnen benaderen.

In tegenstelling tot de MILP-modellen kan in deze simulaties één geïntegreerde planning opgesteld worden voor de volledige onderzoeksperiode van twee jaar. Donoren die gedurende deze periode binnenkomen, worden dan dus niet per dag afzonderlijk gepland, maar maken deel uit van één doorlopende simulatie. Deze werkwijze sluit beter aan bij de realiteit, omdat beslissingen op verschillende dagen elkaar kunnen beïnvloeden. In de eerste drie paragrafen hieronder is deze methode gebruikt.

Voor iedere combinatie van scenario en heuristiek worden de prestaties geëvalueerd aan de hand van de donorverwerkingsgraad, de totale personeelsinzet, de verdeling van de personeelsuren over verschillende taakcategorieën en teamtypen, en enkele kenmerken van de gegenereerde shifts.

Vervolgens worden in Paragraaf 5.3.4 de resultaten vergeleken met die van de MILP-modellen. Om een eerlijke vergelijking mogelijk te maken, is hiervoor dezelfde werkwijze toegepast als in Paragraaf 5.1 en 5.2. Per simulatie van één dag worden uitsluitend de donoren beschouwd die op die dag binnenkomen, en zij mogen zowel op de dag zelf als de volgende dag ingepland worden. De planning van een dag neemt dus de planning van andere dagen niet mee in de berekening. Deze benadering is minder realistisch dan een doorlopende simulatie over meerdere dagen, maar maakt het mogelijk om de prestaties van de heuristieken rechtstreeks te vergelijken met die van de MILP-modellen.

5.3.1 Donorverwerkingsgraad

Tabel 16 toont voor iedere heuristiek het aantal verwerkte en niet-verwerkte donoren, de verwerkingsgraad en de totale personeelsinzet. Hieruit blijkt dat de prestaties sterk verschillen tussen de onderzochte heuristieken.

De heuristieken H1 en H2 leveren vrijwel identieke resultaten op. In beide gevallen presteert het decentrale scenario beter dan het gedeeltelijk centrale scenario: de verwerkingsgraad ligt ongeveer twee procentpunten hoger. Daar staat tegenover dat voor deze heuristieken in totaal aanzienlijk meer personeelsuren nodig zijn in het decentrale scenario.

De heuristieken H3 en H4 leveren de beste resultaten op. Beide verwerken 6.803 van de 6.886 donoren in het decentrale scenario, hetgeen overeenkomt met een verwerkingsgraad van 98,79%. In het gedeeltelijk centrale scenario daalt de verwerkingsgraad echter naar ongeveer 94,6%, waardoor ruim vier keer zoveel donoren niet worden verwerkt. In dit opzicht presteren H3 en H4 dus slechter dan H1 en H2. Een mogelijke verklaring is dat H3 en H4 donoren gemiddeld later inplannen vanwege het zoeken naar de goedkoopste toewijzingen, wat meestal betekent dat donoren in dezelfde shifts worden gepland. H1 en H2 zoeken naar het dichtstbijzijnde team, wat meestal betekent dat een donor meteen wordt ingepland, of aan het begin van de eerstvolgende startende shift. Door donoren gemiddeld later in te plannen, is er een groter risico dat er op drukke dagen een achterstand ontstaat die niet ingehaald kan worden, waardoor sommige donoren niet verwerkt kunnen worden.

Opvallend is verder dat H3 en H4 vrijwel identieke resultaten produceren, zowel wat betreft de verwerkingsgraad als de totale personeelsinzet. Dit wijst erop dat routes achteraf optimaliseren geen voordeel oplevert bij de toewijzing van H3.

H4 heeft één donor meer verwerkt dan H3 bij het gedeeltelijk centrale scenario. Hoewel deze twee heuristieken tijdens een beslissingsmoment precies dezelfde donoren zouden toewijzen, kan een verandering in de volgorde van de wachtrij bij H4 ervoor zorgen dat later een andere taak wel of juist niet mogelijk wordt gemaakt.

Een directe vergelijking van de totale personeelsuren tussen de scenario's is niet volledig eerlijk, omdat een scenario-heuristiek combinatie dat meer donoren verwerkt vanzelfsprekend ook meer werkzaamheden uitvoert. Daarom is in Tabel 16 het gemiddelde aantal personeelsuren per verwerkte donor opgenomen.

Voor H1 en H2 verandert de conclusie hierdoor nauwelijks. Hoewel het gedeeltelijk centrale scenario meer donoren mist, blijft het aantal benodigde personeelsuren per verwerkte donor aanzienlijk lager dan in het decentrale scenario. Voor H3 en H4 ontstaat echter een ander beeld. Ondanks de lagere totale personeelsinzet van het gedeeltelijk centrale scenario blijkt de personeelsinzet per verwerkte donor juist hoger te liggen dan in het decentrale scenario (10,17 tegenover 9,85 personeelsuren per donor). Dit wijst erop dat de lagere totale werkbelasting van het gedeeltelijk centrale scenario wordt veroorzaakt door het grotere aantal niet-verwerkte donoren.

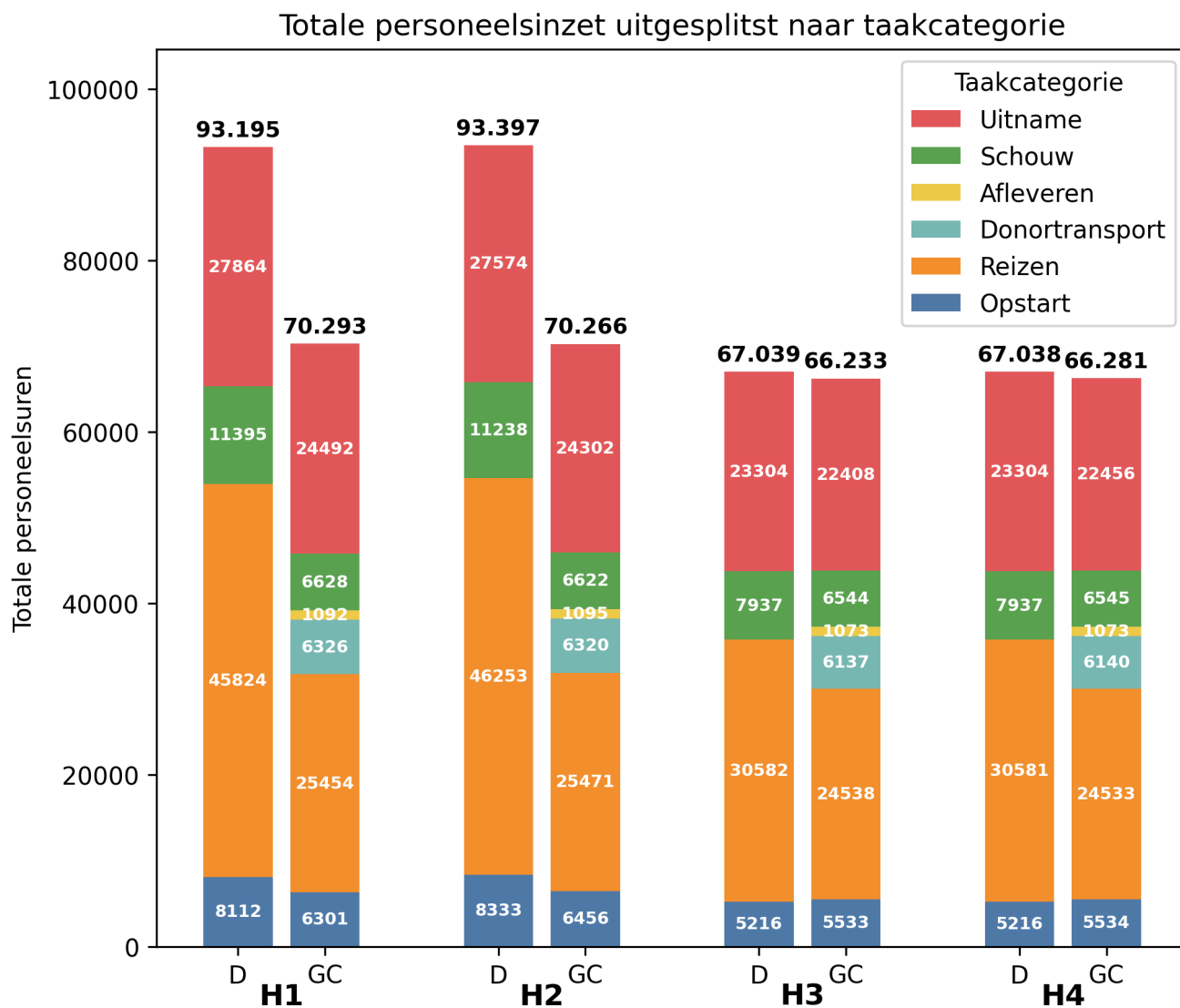
Heuristiek	Model	Aantal verwerkte donoren	Aantal niet-verwerkte donoren	Verwerkingsgraad (%)	Totale personeelsuren	Gemiddeld aantal personeelsuren per verwerkte donor
H1	D	6.740	146	97,88	93.195	13,83
	GC	6.594	292	95,78	70.293	10,66
H2	D	6.736	150	97,82	93.397	13,87
	GC	6.583	303	95,62	70.266	10,67
H3	D	6.803	83	98,79	67.039	9,85
	GC	6.514	372	94,62	66.233	10,17
H4	D	6.803	83	98,79	67.038	9,85
	GC	6.515	371	94,64	66.281	10,17

Tabel 16: Vergelijking van de prestaties van de vier heuristieken voor het decentrale scenario (D) en het gedeeltelijk centrale scenario (GC), bij één doorlopende simulatie van 2024-2025.

5.3.2 Totale personeelsinzet

Om beter te begrijpen waardoor de verschillen tussen de heuristieken ontstaan, wordt de totale personeelsinzet in deze paragraaf uitgesplitst naar taakcategorie. Figuur 11 toont voor iedere heuristiek en voor beide scenario's de verdeling van de personeelsuren over opstarttijd, reizen, donortransport, afleveren, schouw en uitname.

Bij de interpretatie van deze resultaten is het belangrijk om de bevindingen uit de vorige paragraaf in gedachten te houden. Met name voor H3 en H4 bestaan aanzienlijke verschillen in het aantal verwerkte donoren tussen het decentrale en gedeeltelijk centrale scenario. Een lager totaal aantal personeelsuren betekent in dat geval niet per se dat het scenario efficiënter is. Een deel van de werkbelasting valt immers weg doordat meer donoren niet worden verwerkt.



Figuur 11: Verdeling van de totale personeelsinzet over de verschillende taakcategorieën voor de vier onderzochte heuristieken, in één doorlopende simulatie. Binnen iedere heuristiek wordt een vergelijking gemaakt tussen het gedecentraliseerde scenario (D) en het gecentraliseerde scenario (GC). De totale hoogte van iedere staaf correspondeert met de totale personeelsinzet, terwijl de gekleurde segmenten het aandeel van de verschillende taakcategorieën weergeven.

Figuur 11 laat nogmaals zien dat de heuristieken in twee groepen kunnen worden verdeeld: H1 met H2, en H3 met H4.

Voor H1 en H2 blijkt het gedeeltelijk centrale scenario aanzienlijk minder personeelsuren te vereisen dan het decentrale scenario. De belangrijkste oorzaak hiervan is de sterke afname van de personeelsuren voor reizen en schouw, omdat deze in het gedeeltelijk centrale scenario altijd door tweepersoonsteams worden verricht. Hoewel in het gedeeltelijk centrale scenario aanvullende werkzaamheden ontstaan in de vorm van donortransport en het afleveren van donoren, wordt deze extra werkbelasting ruimschoots gecompenseerd door de besparingen op reizen en schouw.

Bij H3 en H4 is een ander patroon zichtbaar. Ook hier nemen de personeelsuren voor reizen en schouw af in het gedeeltelijk centrale scenario, maar deze reductie wordt vrijwel volledig gecompenseerd door de benodigde donortransporten en afleveractiviteiten. Hierdoor verschillen de totale personeelsuren van beide scenario's slechts beperkt. Zoals in de vorige paragraaf werd besproken, zijn de gemiddelde personeelsuren per verwerkte donor voor zowel H3 als H4 hoger bij het gedeeltelijk centrale scenario.

De overeenkomsten tussen H1 en H2 enerzijds en H3 en H4 anderzijds kunnen worden verklaard vanuit de manier waarop de heuristieken teams selecteren. H2 is ontwikkeld als een uitbreiding van H1, waarbij naast afstand ook rekening wordt gehouden met de eerstvolgende beschikbaarheid van een team. De resultaten laten echter zien dat deze uitbreiding vrijwel geen invloed heeft op zowel de verwerkingsgraad als de totale personeelsinzet. De wachtrij-optimalisatie van H4 heeft ook vrijwel geen invloed.

Het grote verschil tussen H1/H2 en H3/H4 wordt veroorzaakt door de keuze van het uitnameteam. H1 en H2 selecteren primair het dichtstbijzijnde beschikbare team en houden daarbij geen rekening met de grootte van het team. In het decentrale scenario leidt dit regelmatig tot de inzet van grotere teams, waardoor de reistijd, schouwtijd en de uitnametijd toenemen. H3 en H4 kiezen daarentegen expliciet het team dat de minste extra personeelsuren veroorzaakt. Daardoor wordt vaker voor kleinere teams gekozen wanneer meerdere teams een donor kunnen behandelen.

In het gedeeltelijk centrale scenario is dit effect minder sterk zichtbaar. Daar mogen uitsluitend corneateams reizen en donortransporten uitvoeren. Deze teams bestaan uit twee personen en zijn daarmee minstens de helft kleiner dan sommige gespecialiseerde uitnameteams in het decentrale scenario. Hierdoor selecteren H1 en H2 in het gedeeltelijk centrale scenario automatisch relatief goedkope teams. Als gevolg daarvan liggen de totale personeelsuren van H1 en H2 in het gedeeltelijk centrale scenario veel dichterbij die van H3 en H4 dan in het decentrale scenario.

De exacte waarden behorend bij Figuur 11 zijn weergegeven in Tabel 17. Naast de absolute aantallen personeelsuren bevat deze tabel ook het relatieve aandeel van iedere taakcategorie in de totale personeelsinzet.

Een alternatieve manier om het effect van de verschillende heuristieken te bestuderen is door de totale personeelsinzet uit te splitsen naar teamcategorie. Tabel 18 toont voor iedere heuristiek hoeveel personeelsuren zijn gebruikt door de cornea-, huid-, hartklep- en botteams.

De resultaten bevestigen het beeld uit de vorige analyse. In het decentrale scenario besteden H1 en H2 een aanzienlijk groter aandeel van de totale personeelsinzet aan hartklep- en botteams dan H3 en H4. Voor H1 en H2 wordt circa 70% van alle personeelsuren uitgevoerd door deze twee teamcategorieën, tegenover ongeveer 40% voor H3 en H4. Omdat hartklep- en botteams uit respectievelijk vier en zes personen bestaan, leidt hun inzet tot een hoge personeelsbelasting. Dit verschil kan worden verklaard door de wijze waarop de heuristieken teams selecteren, zoals eerder besproken.

Heur.	Model	Totaal	Opstart	Reizen	Donortransp.	Afleveren	Schouw	Uitname
H1	D	93.195	8.112 (8,70%)	45.824 (49,17%)	–	–	11.395 (12,23%)	27.864 (29,90%)
	GC	70.293	6.301 (8,96%)	25.454 (36,21%)	6.326 (9,00%)	1.092 (1,55%)	6.628 (9,43%)	24.492 (34,84%)
H2	D	93.397	8.333 (8,92%)	46.253 (49,52%)	–	–	11.238 (12,03%)	27.574 (29,52%)
	GC	70.266	6.456 (9,19%)	25.471 (36,25%)	6.320 (8,99%)	1.095 (1,56%)	6.622 (9,42%)	24.302 (34,59%)
H3	D	67.039	5.216 (7,78%)	30.582 (45,62%)	–	–	7.937 (11,84%)	23.304 (34,76%)
	GC	66.233	5.533 (8,35%)	24.538 (37,05%)	6.137 (9,27%)	1.073 (1,62%)	6.544 (9,88%)	22.408 (33,83%)
H4	D	67.038	5.216 (7,78%)	30.581 (45,62%)	–	–	7.937 (11,84%)	23.304 (34,76%)
	GC	66.281	5.534 (8,35%)	24.533 (37,01%)	6.140 (9,26%)	1.073 (1,62%)	6.545 (9,87%)	22.456 (33,88%)

Tabel 17: Totale personeelsinzet per taakcategorie. Tussen haakjes staat het percentage van de totale personeelsinzet.

In het gedeeltelijk centrale scenario is dit effect veel minder zichtbaar. Daar worden reizen en donortransporten uitsluitend uitgevoerd door corneateams, die uit twee personen bestaan. Alleen voor donoren van explantatietype 2, 3 en 4 bestaat nog een keuze tussen verschillende typen uitnameteams. Deze groep vormt echter slechts een beperkt deel van alle donoren. Het merendeel betreft corneadonoren, waarvoor uitsluitend een corneateam kan worden ingezet. Voor corneadonoren (bij GC) is het dichtstbijzijnde team over het algemeen ook het team met de minste marginale kosten, waardoor de vier heuristische soortgelijke resultaten geven. Hierdoor liggen de verdelingen over de teamcategorieën voor H1 t/m H4 in het gedeeltelijk centrale scenario veel dichter bij elkaar dan in het decentrale scenario.

5.3.3 Analyse van de diensten

Tabel 19 toont enkele kenmerken van de diensten die door de verschillende heuristieken worden gegenereerd. Voor iedere combinatie van scenario en heuristiek zijn het gemiddelde aantal diensten per dag, de gemiddelde dienstduur en de gemiddelde duur van de kortste en langste dienst per dag weergegeven.

Hetzelfde algemene patroon als in Tabel 10 voor de MILP-modellen is ook hier zichtbaar. In het gedeeltelijk centrale scenario worden gemiddeld meer diensten per dag ingezet dan in het decentrale scenario, terwijl deze diensten gemiddeld korter duren. De centralisatie van een deel van de werkzaamheden leidt daarmee tot een verdere opsplitsing van het werk over meerdere teams, waaronder de twee extra corneateams.

Binnen het decentrale scenario bestaan duidelijke verschillen tussen de heuristieken. H1 en H2 genereren gemiddeld ongeveer 5,4 diensten per dag, terwijl dit voor H3 en H4 slechts 4,6 diensten per

Heur.	Model	Corneateams	Huidteams	Hartklepteams	Botteams
H1	D	20.193 (21,67%)	6.966 (7,48%)	24.241 (26,01%)	41.794 (44,85%)
	GC	50.207 (71,42%)	1.308 (1,86%)	5.608 (7,98%)	13.170 (18,74%)
H2	D	20.280 (21,71%)	7.735 (8,28%)	23.890 (25,58%)	41.492 (44,43%)
	GC	50.278 (71,55%)	1.424 (2,03%)	5.170 (7,36%)	13.394 (19,06%)
H3	D	23.911 (35,67%)	15.797 (23,56%)	9.234 (13,77%)	18.097 (27,00%)
	GC	48.722 (73,56%)	2.902 (4,38%)	3.185 (4,81%)	11.424 (17,25%)
H4	D	23.902 (35,65%)	15.804 (23,58%)	9.234 (13,77%)	18.097 (27,00%)
	GC	48.720 (73,51%)	2.896 (4,37%)	3.183 (4,80%)	11.483 (17,32%)

Tabel 18: Verdeling van de totale personeelsinzet over de verschillende teamcategorieën voor de vier onderzochte heuristieken. Tussen haakjes staat het percentage van de totale personeelsinzet.

dag bedraagt. Tegelijkertijd zijn de diensten van H3 en H4 gemiddeld langer. Ook de gemiddelde duur van zowel de kortste als de langste dagelijkse dienst ligt bij H3 en H4 hoger dan bij H1 en H2.

Deze verschillen sluiten aan bij de manier waarop de heuristieken teams selecteren. H3 en H4 houden bij de toewijzing van donoren rekening met de verwachte toename van de totale personeelsinzet, waaronder ook de opstarttijd van een nieuwe dienst. Daardoor wordt vaker gekozen voor het toevoegen van een donor aan een reeds actieve dienst in plaats van het starten van een extra dienst.

Ook binnen het gedeeltelijk centrale scenario vormen H1 en H2 enerzijds en H3 en H4 anderzijds twee duidelijk herkenbare groepen. H1 en H2 gebruiken gemiddeld ongeveer 6,1 diensten per dag, tegenover 5,7 diensten per dag voor H3 en H4. De gemiddelde dienstduur ligt voor H3 en H4 ongeveer 0,2 tot 0,3 uur hoger. De verschillen zijn echter kleiner dan in het decentrale scenario, wat aansluit bij de eerdere bevinding dat de keuzevrijheid van de heuristieken in het gedeeltelijk centrale scenario beperkter is.

Opvallend is ten slotte dat H3 en H4 in beide scenario's vrijwel identieke resultaten opleveren. Dit bevestigt opnieuw dat de extra optimalisaties in H4 nauwelijks invloed hebben op de uiteindelijke planning ten opzichte van H3.

5.3.4 Vergelijking met de MILP-modellen

De resultaten in Paragraaf 5.3.1, 5.3.2 en 5.3.3 zijn gebaseerd op een doorlopende simulatie over de volledige onderzoeksperiode van twee jaar. Deze werkwijze sluit goed aan bij de praktijk,

Heuristiek	Model	Gemiddeld aantal diensten per dag	Gemiddelde dienstduur (uur)	Gemiddelde minimale dagelijkse dienstduur (uur)	Gemiddelde maximale dagelijkse dienstduur (uur)
H1	D	5,27	6,90	3,55	10,90
	GC	6,03	6,66	3,12	9,16
H2	D	5,47	6,71	3,38	10,75
	GC	6,16	6,52	3,02	9,09
H3	D	4,62	7,45	4,55	9,91
	GC	5,73	6,80	3,36	9,24
H4	D	4,62	7,45	4,55	9,91
	GC	5,73	6,80	3,38	9,24

Tabel 19: Vergelijking van de dienstkenmerken voor de vier heuristieken in het decentrale scenario (D) en het gedeeltelijk centrale scenario (GC).

maar maakt een directe vergelijking met de MILP-modellen uit Paragraaf 5.1 en 5.2 lastig. De MILP-modellen werden immers per dag opgelost, waarbij de planning van verschillende dagen volledig onafhankelijk was.

Om beide benaderingen eerlijk te kunnen vergelijken, zijn de simulaties daarom opnieuw uitgevoerd volgens dezelfde dag-tot-dag werkwijze als de MILP-modellen. Voor iedere dag worden uitsluitend de donoren beschouwd die op die dag binnenkomen, waarna de planning van verschillende dagen volledig onafhankelijk van elkaar wordt bepaald. Daarnaast zijn uitsluitend de 683 dagen meegenomen waarop het decentrale en gedeeltelijk centrale MILP-model exact dezelfde set niet-verwerkte donoren opleverden. Hierdoor kunnen verschillen tussen de resultaten van de MILP-modellen worden toegeschreven aan de gebruikte planningsmethode en niet aan verschillen in de donorverzameling.

De resultaten zijn weergegeven in Tabel 20.

In het decentrale scenario blijken H3 en H4 de prestaties van het MILP-model relatief goed te benaderen. Beide heuristieken verwerken 6.307 van de 6.320 beschikbare donoren, tegenover 6.309 voor het MILP-model. De totale personeelsinzet ligt met circa 63.732 personeelsuren ongeveer 10,3% boven die van het MILP-model. H1 en H2 hebben een kleine toename aan niet-verwerkte donoren, en een substantiële toename aan totale personeelsuren.

In het gedeeltelijk centrale scenario zijn de verschillen in de verwerkingsgraad groter. H1 en H2 verwerken respectievelijk 6.256 en 6.252 donoren, terwijl H3 en H4 uitkomen op 6.220 verwerkte donoren. De verwerkingsgraad blijft voor alle heuristieken echter boven de 98%.

Voor H1 en H2 bedraagt de totale personeelsinzet respectievelijk 17,9% en 19,0% meer dan voor het MILP-model. Ook het gemiddelde aantal personeelsuren per verwerkte donor ligt duidelijk hoger, namelijk respectievelijk 18,9% en 20,0% hoger dan bij het MILP-model. H3 en H4 presteren gunstiger: de totale personeelsinzet ligt ongeveer 10,4% boven die van het MILP-model, terwijl het gemiddelde aantal personeelsuren per verwerkte donor circa 12,0% hoger ligt.

Om te onderzoeken of de verschillen tussen de heuristieken en het MILP-model statistisch significant zijn, zijn gepaarde t-toetsen uitgevoerd op de dagelijkse personeelsinzet. De resultaten

Model	Heuristiek	Verwerkte donoren	Niet-verwerkte donoren	Verwerkingsgraad (%)	Totale personeelsuren	Gemiddelde personeelsuren per verwerkte donor
D	H1	6.293	27	99,57	88.118	14,00
	H2	6.291	29	99,54	98.264	15,62
	H3	6.307	13	99,79	63.732	10,10
	H4	6.307	13	99,79	63.731	10,10
	MILP	6.309	11	99,83	57.791	9,16
GC	H1	6.256	64	98,99	69.103	11,05
	H2	6.252	68	98,92	69.705	11,15
	H3	6.220	100	98,42	64.657	10,40
	H4	6.220	100	98,42	64.663	10,40
	MILP	6.309	11	99,83	58.591	9,29

Tabel 20: Vergelijking van de prestaties van de heuristieken en het MILP-model voor de 683 dagen waarop het decentrale (D) en gedeeltelijk centrale (GC) MILP-model exact dezelfde set niet-verwerkte donoren opleverden.

zijn weergegeven in Tabel 21.

Scenario	Heuristiek	Gemiddeld verschil (uur/dag)	95%-BI	<i>p</i> -waarde
D	H1	44,40	[42,88 ; 45,92]	< 0,001
D	H2	59,26	[57,24 ; 61,27]	< 0,001
D	H3	8,70	[8,15 ; 9,25]	< 0,001
D	H4	8,70	[8,14 ; 9,25]	< 0,001
GC	H1	15,39	[14,53 ; 16,25]	< 0,001
GC	H2	16,27	[15,36 ; 17,18]	< 0,001
GC	H3	8,88	[7,95 ; 9,81]	< 0,001
GC	H4	8,89	[7,96 ; 9,82]	< 0,001

Tabel 21: Resultaten van gepaarde t-toetsen voor verschillen in dagelijkse personeelsinzet tussen de heuristieken en het MILP-model. Positieve waarden duiden op meer personeelsuren bij de heuristieken dan bij het MILP-model. Het is een vergelijking voor de 683 dagen waarop het decentrale (D) en gedeeltelijk centrale (GC) MILP-model exact dezelfde set niet-verwerkte donoren opleverden. BI = betrouwbaarheidsinterval.

Voor alle heuristieken werd zowel in het decentrale als in het gedeeltelijk centrale scenario een statistisch significant verschil gevonden ($p < 0,001$). De grootte van dit verschil varieert echter sterk tussen de heuristieken.

Tabel 22 bekijkt voor iedere planningsmethode het verschil in de dagelijkse personeelsinzet tussen het decentrale en gedeeltelijk centrale scenario. Voor H1 en H2 worden grote verschillen gevonden.

Voor H3, H4 en het MILP-model zijn de verschillen aanzienlijk kleiner. Hoewel deze verschillen statistisch significant blijken, bedraagt het gemiddelde verschil slechts ongeveer één tot anderhalf

Heuristiek	Gemiddeld verschil (uur/dag)	95%-BI	<i>p</i> -waarde
H1	27,84	[26,26 ; 29,42]	< 0,001
H2	41,81	[40,01 ; 43,61]	< 0,001
H3	-1,35	[-2,60 ; -0,10]	0,034
H4	-1,36	[-2,62 ; -0,11]	0,033
MILP	-1,17	[-2,15 ; -0,20]	0,019

Tabel 22: Resultaten van gepaarde t-toetsen voor verschillen in dagelijkse personeelsinzet tussen het decentrale (D) en gedeeltelijk centrale (GC) scenario. Positieve waarden betekenen dat D meer personeelsuren vereist dan GC.

personeelsuur per dag. Dit ondersteunt de eerdere conclusie dat het decentrale en gedeeltelijk centrale scenario bij gebruik van H3, H4 of het MILP-model zeer vergelijkbare prestaties leveren.

Wanneer de resultaten van het decentrale en gedeeltelijk centrale scenario worden vergeleken, blijken de verschillen tussen beide organisatiemodellen relatief beperkt. Voor de betere heuristieken H3 en H4 presteert het decentrale scenario iets gunstiger, zowel wat betreft de verwerkingsgraad als de gemiddelde personeelsinzet per donor. De heuristieken H1 en H2 blijken in beide scenario's duidelijk minder efficiënt, maar het negatieve effect hiervan is in het gedeeltelijk centrale scenario kleiner dan in het decentrale scenario. Dit sluit aan bij de bevindingen uit de eerdere analyses, waaruit bleek dat de keuzevrijheid van de heuristieken in het gedeeltelijk centrale scenario beperkter is doordat een groot deel van de werkzaamheden door de tweepersoons corneateams moet worden uitgevoerd.

Opvallend is dat de verschillen tussen de beste heuristieken en het MILP-model relatief beperkt blijven (tot 12% verschil in het gemiddelde aantal personeelsuren per verwerkte donor), ondanks het fundamentele verschil in beschikbare informatie. Daarnaast is te zien dat in deze grotere dataset van 683 dagen wel een statistisch significant verschil wordt gevonden tussen de MILP-modellen, wat eerder in Paragraaf 5.2.3 niet het geval was.

Deze resultaten suggereren dat verdere verbeteringen mogelijk zijn. Enerzijds zouden meer geavanceerde heuristieken kunnen worden ontwikkeld die explicieter rekening houden met toekomstige gevolgen van huidige beslissingen. Anderzijds zou een datagedreven benadering kunnen worden onderzocht, waarbij een model wordt getraind op MILP-oplossingen om te leren welke toewijzingen in vergelijkbare situaties tot goede resultaten leiden. Een belangrijk vraagstuk daarbij is het vinden van de juiste balans tussen het direct inplannen van een donor en het bewust wachten op mogelijke toekomstige combinaties. Te weinig wachten kan leiden tot inefficiënte routes, terwijl te veel uitstel ertoe kan leiden dat later binnenkomende donoren mogelijk niet meer kunnen worden ingepland.

6 Discussie & Conclusie

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste bevindingen van het onderzoek nogmaals besproken en worden aanbevelingen voor WUON geformuleerd. Vervolgens worden de beperkingen van het onderzoek belicht en ten slotte wordt deze scriptie afgesloten met suggesties voor toekomstig onderzoek.

6.1 Belangrijkste bevindingen

Het doel van dit onderzoek was het bepalen van het effect van centralisatie van weefseluitnames op de benodigde personeelsinzet en donorverwerkingsgraad. Hiervoor werden drie scenario's onderzocht: een decentrale werkwijze, een gedeeltelijk centrale werkwijze en een volledig centrale werkwijze.

De resultaten laten zien dat de gevolgen van centralisatie sterk afhankelijk zijn van welke typen donoren worden gecentraliseerd. Het gedeeltelijk centrale model had de hoogste verwerkingsgraad van de drie onderzochte scenario's. In de MILP-analyse werd 99,5% van de donoren verwerkt, tegenover 99,2% in het decentrale model en 96,1% in het volledig centrale model. Tegelijkertijd bleek de benodigde personeelsinzet van het gedeeltelijk centrale model vrijwel gelijk aan die van het decentrale model. Het verschil in gemiddelde dagelijkse personeelsinzet bedroeg slechts 0,27 personeelsuren en was niet statistisch significant.

Het volledig centrale model presteerde duidelijk minder goed. Hoewel centralisatie de reistijd van gespecialiseerde uitnameteams vermindert, leidde het grote aantal donortransporten tot een sterke toename van de totale werkbelasting. In de onderzochte periode waren ongeveer 73% meer personeelsuren nodig dan in het decentrale model. Daarnaast konden aanzienlijk meer donoren niet worden ingepland. De analyse van de oplossingen liet zien dat niet de capaciteit van de uitnameteams, maar vooral de transportcapaciteit hierbij de grootste beperkende factor was.

Het verschil tussen het gedeeltelijk en volledig centrale model wordt veroorzaakt door de corneadonoren. Corneadonoren vormen het grootste deel van de totale donorstroom. In het gedeeltelijk centrale model blijven deze donoren decentraal behandeld, terwijl zij in het volledig centrale model allemaal moeten worden vervoerd. De resultaten laten zien dat juist deze centralisatie van corneadonoren leidt tot een sterke toename van het aantal transportbewegingen en daarmee van de benodigde personeelsinzet. Voor corneaweefsels nam de gemiddelde werkbelasting zelfs toe van 6,38 personeelsuren per weefsel in het decentrale model naar 13,92 personeelsuren in het volledig centrale model.

De effecten van centralisatie verschilden bovendien sterk per weefseltype. Voor huiduitnames leidde centralisatie tot een hogere personeelsinzet. Omdat huiduitnames in alle scenario's door tweepersoonsteams worden uitgevoerd, levert centralisatie hier nauwelijks voordelen op, terwijl wel extra donortransport nodig is. Voor hartklep- en botuitnames werd juist een beperkte afname van de benodigde personeelsinzet gevonden. Bij deze uitnames weegt de besparing doordat schouw en reistijd door kleinere teams kunnen worden uitgevoerd zwaarder dan de extra werkzaamheden voor donortransport.

Een tweede belangrijke bevinding is de rol van de schouw binnen de gecentraliseerde scenario's. Uit de historische gegevens bleek dat bij een substantieel deel van de donoren uiteindelijk een lager teamniveau nodig was dan op basis van de initiële acceptatie werd verwacht. Daarnaast was bij meer dan 10% van de donoren uiteindelijk geen geschikt weefsel beschikbaar voor uitname. Door de schouw op de donorlocatie uit te voeren, kunnen onnodige donortransporten worden voorkomen

en kan worden bepaald welk uitnameteam daadwerkelijk nodig is. De goede prestaties van het gedeeltelijk centrale model lijken voor een deel door dit mechanisme te worden verklaard.

Ten slotte laat de vergelijking tussen de MILP-modellen en de online simulaties zien dat relatief eenvoudige heuristieken de theoretische ondergrenzen redelijk goed kunnen benaderen. Met name heuristieken H3 en H4 bleven zowel in het decentrale als in het gedeeltelijk centrale scenario ongeveer 10-12% boven de door de MILP-modellen gevonden personeelsinzet, ondanks het ontbreken van informatie over toekomstige donoren.

6.2 Implicaties voor WUON

De resultaten van dit onderzoek suggereren dat gedeeltelijke centralisatie een interessant alternatief kan vormen voor de huidige decentrale werkwijze van WUON. Wat betreft personeelsinzet is het mogelijk om huid-, hartklep- en botuitnames te centraliseren zonder een substantiële toename van de totale werkbelasting. Tegelijkertijd werd in de modellen een iets hogere verwerkingsgraad bereikt dan in het decentrale scenario.

De resultaten laten daarnaast zien dat centralisatie niet als één uniforme maatregel moet worden beschouwd. Het volledig centrale model presteerde aanzienlijk slechter dan zowel het decentrale als het gedeeltelijk centrale model. Voor WUON betekent dit dat eventuele centralisatie zich waarschijnlijk het beste kan richten op de complexere uitnames, terwijl cornea-uitnames voorlopig decentraal georganiseerd blijven.

De resultaten van het gedeeltelijk centrale model ondersteunen de keuze om de schouw op de donorlocatie uit te voeren voordat wordt besloten om een donor naar een uitnamecentrum te vervoeren.

Daarnaast wijzen de resultaten erop dat transportcapaciteit een cruciale factor vormt binnen een gecentraliseerde werkwijze. In het volledig centrale model ontstonden de belangrijkste capaciteitsknelpunten niet bij de uitnameteams, maar bij de transportteams. Ook in het gedeeltelijk centrale model bleken niet-verwerkte donoren vaak samen te hangen met een gebrek aan beschikbare transportcapaciteit. Voor een eventuele implementatie van centralisatie lijkt het daarom belangrijk om donortransport goed te organiseren, naast het inrichten van het uitnamecentrum.

Tegelijkertijd moet worden benadrukt dat deze studie uitsluitend de gevolgen voor de personeelsinzet en de verwerkingsgraad heeft onderzocht. Andere relevante factoren, zoals investeringskosten, huisvestingskosten, de aanschaf en het onderhoud van voertuigen, wetten, effecten op nabestaanden en mogelijke kwaliteitsverschillen van het uitgenomen weefsel, zijn buiten beschouwing gelaten. Op basis van de resultaten kan daarom niet worden geconcludeerd of gedeeltelijke centralisatie ook vanuit financieel of organisatorisch perspectief de meest aantrekkelijke keuze is. Voor een daadwerkelijke beleidskeuze lijkt een kosten-batenanalyse daarom noodzakelijk.

6.3 Beperkingen van het onderzoek

Bij de interpretatie van de resultaten moeten verschillende beperkingen van dit onderzoek in acht worden genomen.

Een eerste belangrijke beperking betreft de beschikbaarheid van gegevens over procedures. Voor activiteiten zoals de schouw, de voorbereiding van een uitname, donortransport en de uitname zelf waren geen gedetailleerde historische tijdsregistraties beschikbaar. Daarom zijn voor deze activiteiten vaste tijdschattingen gebruikt op basis van expertise van medewerkers van de NTS en

WUON. In de praktijk kunnen deze procedures echter aanzienlijk variëren. Zo kunnen uitnames langer duren door complicaties, terwijl schouwen extra tijd kunnen kosten wanneer aanvullende medische informatie nodig is. De modellen beschrijven daardoor een gemiddelde situatie en houden geen rekening met onzekerheid in de duur van processen.

Daarnaast zijn zowel de MILP-modellen als de simulatiemodellen grotendeels deterministisch. Hoewel de simulatie rekening houdt met de dynamische aankomst van nieuwe donoren, wordt verondersteld dat alle reistijden, schouwtijden en uitnameduren exact bekend zijn. Ook wordt tijdens de simulatie gebruikgemaakt van de daadwerkelijk uitgevoerde uitnames zoals die in de historische data zijn geregistreerd. Hierdoor is vooraf bekend welke weefsels uiteindelijk geschikt blijken voor uitname en hoe lang de bijbehorende procedures duren. In de praktijk is deze informatie pas beschikbaar nadat de schouw en bloedafname hebben plaatsgevonden. De simulatiemodellen beschikken daardoor over informatie die in de praktijk niet altijd vooraf beschikbaar is. Dit kan de prestaties van de modellen enigszins overschatten.

Een derde beperking betreft de gebruikte historische donorgegevens. De dataset bevat uitsluitend donoren die in het verleden daadwerkelijk door WUON zijn verwerkt. Daardoor is het aantal donoren reeds beïnvloed door de capaciteitsbeperkingen van de huidige werkwijze. Potentiële donoren die niet konden worden aangenomen vanwege ‘donorstops’, personeelstekorten of andere beperkingen, ontbreken in de dataset. Hierdoor kan niet worden vastgesteld of de onderzochte scenario’s in staat zouden zijn geweest om een groter aantal donoren te verwerken dan de huidige werkwijze van WUON.

Ook de historische besluitvorming rondom donoracceptatie kan invloed hebben gehad op de resultaten. In sommige gevallen zijn weefsels uiteindelijk niet uitgenomen vanwege omstandigheden in het mortuarium of andere logistieke factoren. Deze uitkomsten zijn als gegeven overgenomen uit de historische data. In een gecentraliseerde werkwijze zouden sommige van deze factoren mogelijk minder vaak voorkomen, waardoor bepaalde weefsels alsnog geschikt hadden kunnen zijn voor uitname. De huidige modellen houden geen rekening met dergelijke veranderingen in de kwaliteit of beschikbaarheid van weefsels als gevolg van een andere organisatie van het proces. Het werkelijke effect van centralisatie op het aantal uitgenomen weefsels kan daardoor enigszins afwijken van de hier gerapporteerde resultaten.

Daarnaast konden de MILP-modellen vanwege hun rekentijd slechts op relatief beperkte tijdsvensters worden toegepast. In de uitgevoerde experimenten werd gebruikgemaakt van tijdsvensters van één dag. Hierdoor wordt slechts beperkt rekening gehouden met combinaties van donoren die op opeenvolgende dagen worden geaccepteerd. In de praktijk kan een donor die laat op een dag binnenkomt invloed hebben op de beschikbare capaciteit van de volgende dag. Hoewel een iteratieve methode met grotere tijdsvensters is onderzocht, bleek deze op de beschikbare hardware niet praktisch uitvoerbaar. De gerapporteerde MILP-oplossingen moeten daarom worden beschouwd als optimale of bijna optimale oplossingen binnen het gekozen tijdsvenster, maar niet noodzakelijk als de optimale planning voor de volledige onderzoeksperiode.

Een verdere beperking is dat slechts één invulling van de centrale organisatie is onderzocht. Voor het gedeeltelijk en volledig centrale scenario zijn specifieke aannames gemaakt over de locatie van het centrale uitnamecentrum, de samenstelling van teams, de bevoegdheden van medewerkers en de verdeling van werkzaamheden tussen transport- en uitnameteams. Alternatieve keuzes, zoals meerdere uitnamecentra, andere dienstroosters of flexibeler inzetbare teams, kunnen mogelijk tot andere resultaten leiden.

Ten slotte richt deze studie zich uitsluitend op prestaties, uitgedrukt in verwerkingsgraad en

personeelsinzet. Andere relevante aspecten zijn buiten beschouwing gelaten. De resultaten geven daarom geen volledig beeld van de maatschappelijke of financiële wenselijkheid van centralisatie, maar uitsluitend van de gevolgen voor de uitvoering van het uitnameproces.

6.4 Toekomstig onderzoek

Dit onderzoek heeft een eerste kwantitatieve vergelijking gemaakt tussen verschillende vormen van centralisatie van weefseluitnames. De ontwikkelde modellen bieden een basis voor vervolgonderzoek, maar laten tegelijkertijd verschillende mogelijkheden zien om de analyses verder uit te breiden en te verfijnen.

Een eerste belangrijke richting betreft het expliciet modelleren van onzekerheid. In de huidige studie zijn vaste waarden gebruikt voor onder meer schouwtijden, uitnameduren en voorbereidingstijden. In de praktijk zijn deze uren echter niet constant. Op dit moment worden deze procedures echter niet systematisch geregistreerd, waardoor onvoldoende gegevens beschikbaar waren om betrouwbare kansverdelingen te schatten. Toekomstig onderzoek zou daarom kunnen starten met het verzamelen van gedetailleerde tijdsregistraties van de verschillende processtappen. Op basis hiervan kunnen vervolgens kansverdelingen voor schouwtijden, uitnameduren en andere activiteiten worden afgeleid. Deze verdelingen kunnen daarna worden gebruikt in stochastische optimalisatie- of simulatiemodellen, waardoor een realistischer beeld ontstaat van de robuustheid van verschillende organisatiemodellen onder mogelijke verstoringen.

Een tweede uitbreiding betreft de modellering van reistijden. In de huidige modellen zijn reistijden gebaseerd op gemiddelde reistijden over de weg. Daarbij wordt geen rekening gehouden met tijdsafhankelijke verkeersdrukte, wegwerkzaamheden of incidentele vertragingen. Het meenemen van tijdsafhankelijke reistijden zou met name relevant kunnen zijn voor uitnames die plaatsvinden tijdens de ochtend- en avondspits. Hierdoor kan beter worden onderzocht hoe gevoelig de verschillende scenario's zijn voor verkeersomstandigheden.

Daarnaast is vervolgonderzoek mogelijk naar de optimalisatiemodellen zelf. Door de sterke groei van het aantal routevariabelen waren de MILP-modellen alleen praktisch toepasbaar voor relatief beperkte tijdsvensters. Een interessante vervolgstap is het verder ontwikkelen van iteratieve methoden met verbredende tijdsvensters. Hiermee kan mogelijk een groot deel van de voordelen van langere planningshorizonten worden benut zonder direct een optimalisatieprobleem voor de volledige onderzoeksperiode op te lossen. Ook decompositiemethoden en andere geavanceerde oplossingsmethoden kunnen hierbij interessant zijn.

Ook de onderzochte organisatievormen kunnen verder worden uitgebreid. In deze studie is slechts één centrale locatie beschouwd en is uitgegaan van een specifieke verdeling van werkzaamheden tussen teams. Toekomstig onderzoek zou alternatieve locaties voor een uitnamecentrum kunnen onderzoeken, evenals scenario's met meerdere centrale locaties. Daarnaast kunnen andere teamstructuren worden geëvalueerd, bijvoorbeeld situaties waarin medewerkers op de centrale locatie flexibel tussen verschillende uitnametypen kunnen worden ingezet, of waarin gespecialiseerde teams slechts een deel van de uitname uitvoeren terwijl andere wefels door afzonderlijke teams worden behandeld. Dergelijke werkwijzen kunnen mogelijk leiden tot een efficiënter gebruik van beperkte gespecialiseerde capaciteit, met name voor botuitnames.

Een verdere uitbreiding betreft de logistieke organisatie van donortransport. In de huidige modellen wordt iedere donor afzonderlijk vervoerd en worden geen combinatieritten toegestaan. Hoewel deze aanname goed aansluit bij de huidige verwachtingen van WUON, kunnen alternatieve

transportmethodes mogelijk tot andere resultaten leiden. Voorbeelden zijn het combineren van meerdere donoren binnen één transportbeweging of het gebruik van externe transportdiensten.

Daarnaast bieden de ontwikkelde simulatiemodellen mogelijkheden voor onderzoek naar geavanceerdere planningsmethoden. De resultaten lieten zien dat de heuristieken H3 en H4 de prestaties van de MILP-modellen verrassend goed konden benaderen. Dit suggereert dat verdere verbeteringen mogelijk zijn. Hierbij kan worden gedacht aan machine-learningmethoden die leren van de oplossingen van de MILP-modellen. Een interessante richting is bijvoorbeeld imitation learning, waarbij een model wordt getraind om beslissingen van optimale of bijna-optimale MILP-oplossingen na te bootsen.

De gebruikte donorverzamelingen zijn gebaseerd op historische gegevens uit 2024 en 2025. Hierdoor beschrijven de resultaten de huidige situatie, maar geven zij geen inzicht in de gevolgen van veranderingen in het aantal donoren. Toekomstig onderzoek kan daarom verschillende groeiscenario's of krimpscenario's onderzoeken. Hierbij kan worden geanalyseerd vanaf welk aantal donoren centralisatie aantrekkelijker of juist minder aantrekkelijk wordt. Ook seizoensinvloeden en regionale verschillen in aantallen donoren kunnen hierbij expliciet worden meegenomen.

Ten slotte is in deze studie voornamelijk gekeken naar personeelsuren en verwerkingsgraden. Voor besluitvorming over een eventuele implementatie van centralisatie is echter een bredere afweging nodig. Vervolgonderzoek zou daarom een integrale kosten-batenanalyse kunnen uitvoeren waarin naast personeelskosten ook investeringen in gebouwen, voertuigen, apparatuur, onderhoud en organisatieveranderingen worden meegenomen. Daarnaast kunnen effecten op weefselkwaliteit, arbeidsomstandigheden en de ervaringen van nabestaanden worden onderzocht. Een dergelijke analyse kan uiteindelijk een completer beeld geven van de wenselijkheid van centralisatie binnen de Nederlandse weefseluitnameketen.

Referenties

- [1] Kris Braekers, Katrien Ramaekers, and Inneke Van Nieuwenhuyse. The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*, 99:300–313, 2016.
- [2] George B. Dantzig and John H. Ramser. The truck dispatching problem. *Management Science*, 6(1):80–91, 1959.
- [3] Jalel Euch, Malek Masmoudi, and Patrick Siarry. Home health care routing and scheduling problems: A literature review. *4OR*, 20(3):351–389, 2022.
- [4] Nederlandse Transplantatie Stichting. Cijfers over weefsels, 2026.
- [5] Nederlandse Transplantatie Stichting. Wat doet de NTS?, 2026.
- [6] Nederlandse Transplantatie Stichting. Weefseldonatie: uitleg voor naasten, 2026.
- [7] Nederlandse Transplantatie Stichting. Weefselketen: donatie en transplantatie, 2026.
- [8] Victor Pillac, Michel Gendreau, Christelle Guéret, and Andrés L. Medaglia. A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 225(1):1–11, 2013.
- [9] Nils van den Berg, Simone de Vos Burchart, Louise Martineau, Markus Niebisch, Colin Please, and Bas van 't Hof. NTS & WUON – SWI 2026. Unpublished technical report, Study Group Mathematics with Industry (SWI), Leiden, The Netherlands, 2026.

Gebruik van generatieve AI:

Voor het programmeren van de modellen en het netjes verwoorden van de scriptie is gebruik gemaakt van Copilot. Bij het programmeren is Copilot gebruikt als hulp om van pseudocode naar Python code te gaan, om te debuggen, en om visualisaties van de resultaten te maken. In de scriptie is Copilot gebruikt als hulp om tabellen in $\text{\LaTeX}$ code te zetten, ideeën beter te verwoorden, zinnen mooier te laten lopen, en fouten te corrigeren. In de literatuurstudie zijn zowel Copilot als ChatGPT gebruikt als hulp om relevante bronnen te vinden. Claude is gebruikt om de eindversie te controleren op fouten.