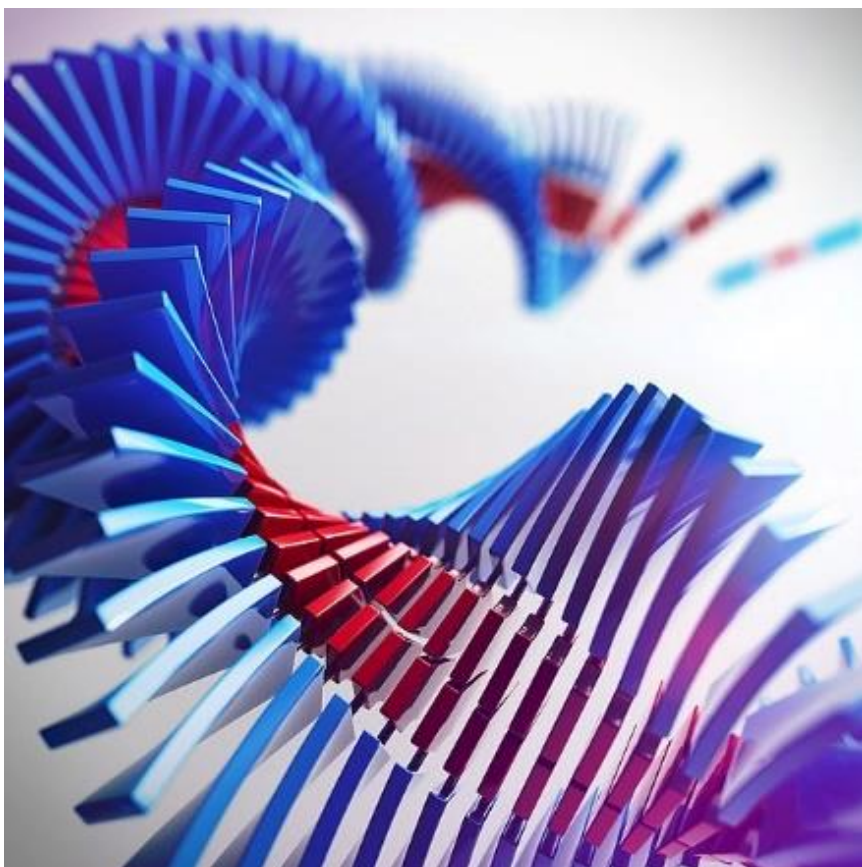


# **Een nieuw fundament: beeld van de bèta sector**



## Inhoudsopgave

<b>Ten geleide</b>	<b>3</b>
<b>1     Introductie</b>	<b>4</b>
1.1    Een enthousiaste start	4
1.2    Aanleiding en doel van de sectorbeelden	5
1.3    De opbouw van de sectorbeelden	7
1.4    Hoe kwamen de sectorbeelden tot stand?	7
<b>2     De uitgangspunten van de sectorbeelden</b>	<b>8</b>
2.1    Wat is bèta en wat is techniek?	8
2.2    Gedeelde problematiek en een gedeelde oplossing	9
2.3    Inhoudelijke verdeling van en binnen de bèta en techniek	9
2.4    Kengetallen van de bèta en techniek	10
2.5    Middelenverdeling over de bèta en techniek	11
2.6    Inzet van de middelen	12
<b>3     Specifieke aandachtspunten voor de bètasector</b>	<b>13</b>
3.1    Belang en kenmerken van de bètawetenschappen	13
3.2    Disciplinaire basis en scherpe keuzes	13
3.3    Integrale versterking van de disciplines	15
<b>4     Beschrijving van de geprioriteerde disciplines</b>	<b>17</b>
4.1    Landschapsanalyses en toekomstbeelden	17
4.2    Informatica	17
4.3    Natuurkunde	20
4.4    Scheikunde	23
4.5    Wiskunde	27
<b>5     Overige disciplines binnen de bètasector</b>	<b>31</b>
5.1    Aanjagende werking van de sectorplannen	31
5.2    Aard- en milieuwetenschappen	31
5.3    Astronomie	33
5.4    Biologie	33
5.5    Farmacie	35
<b>6     Op weg naar nationale profilering</b>	<b>36</b>
6.1    Landschapsanalyse van de participerende universiteiten	36
6.2    Nationale profilering van de informatica	37
6.3    Nationale profilering van de natuurkunde	38
6.4    Nationale profilering van de scheikunde	39
6.5    Nationale profilering van de wiskunde	40
<b>7     Wisselwerking eerste en tweede geldstroom</b>	<b>41</b>
7.1    Eerste geldstroom voor nieuwe posities	41
7.2    Tweede geldstroom voor infrastructuur en tijdelijke staf	41
7.3    Een eerste investering in infrastructuur	42
7.4    Projecten voor nieuwe onderzoekers	43
7.5    Versterking van het zelforganiserend vermogen	43
<b>8     Hoe verder naar sectorplannen</b>	<b>44</b>
8.1    Van een sectorbeeld naar het sectorplan	44
8.2    Wat wordt verwacht van de universiteiten?	44
8.3    Richtlijnen voor een universitair profileringsplan	45
<b>9     Conclusie</b>	<b>48</b>
9.1    Sectorplannen als investeringsmechanisme	48
9.2    Sectorplannen als middel om de sectoren te organiseren	49
<b>Bijlage A: Universiteitsbeelden</b>	<b>50</b>

## Ten geleide

Het regeerakkoord 2017 bevatte de aankondiging van significante investeringen in wetenschap en onderzoek. Deze aankondiging en de uitwerking hiervan door de minister van OCW, waarbij een belangrijke impuls van M€ 60 in de basis van de bèta en technische wetenschappen is voorzien, zijn door de bèta- en technieksectoren met groot enthousiasme ontvangen. Er is veel vertrouwen in het hiervoor gekozen instrument 'sectorplannen', waarbij wordt voortgebouwd op het succes van het eerdere Sectorplan Natuur- en Scheikunde (SNS) onder de Commissie Breimer. Consoliderend op het werk van disciplinaire raden, zoals de Raad voor de Natuur- en Scheikunde en de Wiskunderaad, heeft het veld eensgezind een kwartiermaker aangewezen om de noodzakelijke voorbereidingen voor de sectorplannen bèta en techniek te treffen. Ondergetekende nam de uitdaging aan om samen met de decanen en faculteiten twee concrete sectorbeelden te presenteren. Deze zullen de basis vormen van de sectorplannen waarlangs de beoogde versterking van de kennisinfrastructuur aan de Nederlandse universiteiten zal plaatsvinden. Uitgangspunt voor deze sectorbeelden is het kader van het ministerie van OCW dat op 12 juli 2018 is overhandigd aan de kwartiermaker. Dit sectorbeeld bèta is vastgesteld in het bètadecanenoverleg en wordt voor advies voorgelegd aan de Commissie Sectorplan Bèta en Techniek, met Hans van Duijn als beoogd voorzitter. De minister van OCW zal medio januari op basis van dit advies besluiten over de volgende stappen.

Het was mij als kwartiermaker een eer en genoeg om de voorliggende sectorbeelden met en namens het veld op te mogen stellen. Ik heb hierbij veel hulp gekregen van decanen, onderzoekers, docenten en stafmedewerkers van universiteiten, en NWO. Graag wil ik een paar mensen speciaal bedanken. Allereerst is de deskundigheid, de passie en de grote betrokkenheid van de beide secretarissen Mark Boneschanscher en Rob Olthof onontbeerlijk geweest in het opstellen van deze sectorbeelden. Naast hun gewone werk bij NWO hebben ze mij de mogelijkheid gegeven om samen met hen deze tocht tot hopelijk ieders tevredenheid af te sluiten. Tenslotte wil ik Jasper Knoester en Geert Dewulf, respectievelijk de voorzitter van het bètadecanen overleg en van het recent opgerichte techniekdecanen overleg, bedanken voor hun onuitputtelijk geduld en voortdurende positieve inbreng. Gegeven hun enthousiasme en inzet heb ik het volste vertrouwen dat de sectoren met de aankomende sectorplannen een mooie toekomst tegemoet gaan.

Bert Meijer, Eindhoven 30 november 2018

# 1 Introductie

## 1.1 Een enthousiaste start

Het opstellen van de sectorbeelden en de voorbereidingen voor de sectorplannen hebben binnen het Nederlands universitair onderzoek een nieuwe dynamiek en een hernieuwd elan veroorzaakt. Primair binnen de betrokken instellingen en disciplines, maar in steeds sterkere mate ook tussen de instellingen en disciplines onderling. Alle betrokkenen hebben in grote eensgezindheid gewerkt aan het gezamenlijk formuleren van de doelen die met de sectorplannen worden beoogd. Dit enthousiasme wordt verder versterkt door de grote maatschappelijke interesse in de bèta- en technische wetenschappen, zich uitend in studentenaantallen die hoger zijn dan ooit tevoren, een centrale rol in de maatschappelijke uitdagingen zoals onder andere beschreven in de Nationale Wetenschapsagenda (NWA) en een sterke betrokkenheid bij en vanuit het bedrijfsleven – variërend van het MKB tot wereldspelers als ASML en Shell.

Met het opstellen van deze sectorbeelden en de daarvoor benodigde voorbereidingen, zijn feitelijk al concrete en belangrijke stappen gezet voor de implementatie van de komende sectorplannen:

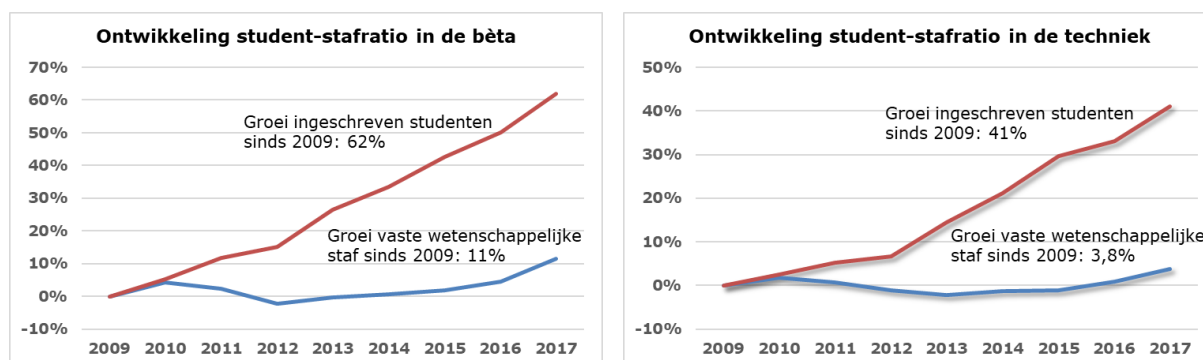
- In goed overleg is een scherpe en gemotiveerde afbakening gemaakt van de disciplines en instellingen die met de komende sectorplannen zullen worden versterkt;
- De betrokken disciplines en instellingen hebben een nulmeting aangeleverd die weergeeft waar ze nu staan en op basis van een omgevingsanalyse een heldere toekomstvisie geformuleerd;
- Bestaande nationale disciplinaire overlegorganen zijn versterkt en waar deze nog niet bestonden is de oprichting ervan in gang gezet, waarbij actief is ingezet op het koppelen van strategie en beleid binnen de eerste en tweede geldstroom;
- Het bètadecanenoverleg heeft nog meer een nationale regierol toebedeeld gekregen en parallel is met veel succes eenzelfde overleg voor de techniekdecanen opgezet;
- Er is een (door)start gemaakt met het op nationaal niveau uitwisselen van 'best practices' op gebied van onderzoek, onderwijs en de inzet vanuit de sectoren voor maatschappelijke doelen;
- Alle betrokkenen zijn druk bezig met het voorbereiden van de werving van topwetenschappers, vooruitlopend op het via de sectorplannen beschikbaar komen van de financiële middelen, die een omvang hebben die sinds de FES-gelden (aardgasbaten) niet meer gezien is.

De kwartiermaker heeft het enthousiasme aan den lijve ondervonden bij de rondgang langs alle Nederlandse bèta- en technische faculteiten ter voorbereiding op de voorliggende sectorbeelden. Uit deze rondgang werd ook duidelijk dat er een diep gevoelde noodzaak is om de basiswerkzaamheden van de universiteiten – onderzoek doen, onderwijs geven en bijdragen aan maatschappelijke doelstellingen – vanuit een integrale aanpak te versterken. De sectorplannen worden hierbij gezien als kansrijk middel om dit vanuit een nationaal gecoördineerde inspanning te verwezenlijken en tegelijkertijd de werk- en regeldruk te verminderen. Hierbij is het van wezenlijk belang dat ook de middelen die via de tweede geldstroom voor de sectorplannen beschikbaar komen daadwerkelijk ten goede komen aan de door de disciplines geselecteerde profileringsgebieden, om zodoende versnippering te voorkomen.

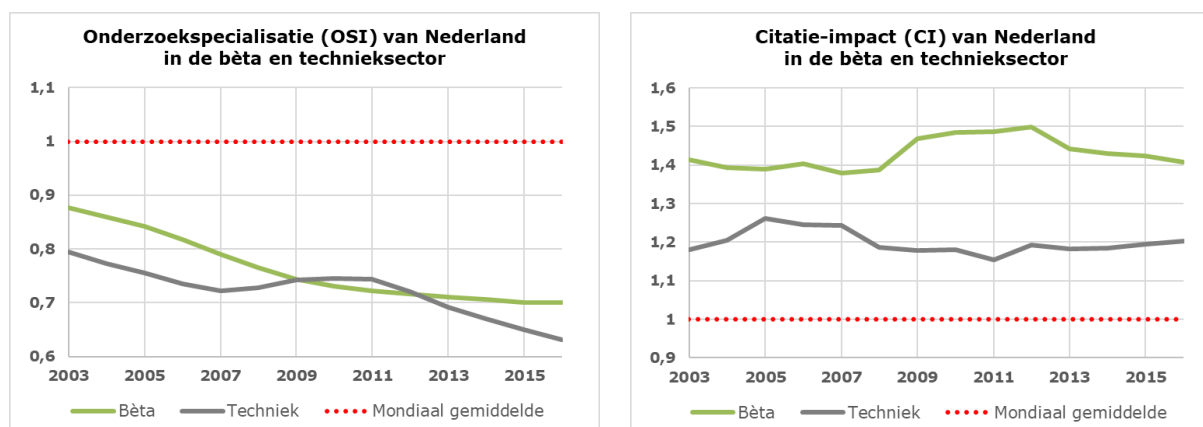
Na het formuleren van de plannen en ambities, zoals beschreven in deze sectorbeelden en de hierop volgende profileringsplannen van de universiteiten, zal nog een verdere tijd van implementatie en doorontwikkeling nodig zijn onder leiding van de Commissie Van Duijn. Dit te meer omdat het met de nu beschikbare middelen niet mogelijk is om alle disciplines binnen de bèta- en technieksector te versterken en tegelijkertijd impact daarin te hebben. Dit laat echter onverlet dat er met de start van de komende sectorplannen bèta en techniek een betekenisvolle stap voor deze sectoren wordt gezet. Deze zal zich vertalen in een verbetering van de kwaliteit van het onderwijs en het vergroten van de impact van het onderzoek, zowel het vrije onderzoek als dat voor maatschappelijke of industriële doelen.

## 1.2 Aanleiding en doel van de sectorbeelden

In het afgelopen decennium heeft in Nederland een enorme herwaardering plaatsgevonden van de bèta- en technieksector aan de basis van de maakindustrie en de digitalisering van de samenleving, en in het hart van de maatschappelijke uitdagingen op thema's als voedsel, gezondheid, veiligheid, klimaat en energie. Hoewel de sectoren deze ontwikkelingen van harte toejuichen en zelf mede in gang hebben gezet door sterk in te zetten op *outreach* en samenwerkingsverbanden voor industrie en samenleving, vond er geen navenante stijging in de hoeveelheid onderwijzend of ondersteunend personeel plaats (figuur 1). Gecombineerd met de 'focus en massa acties' in een achterliggende tijd van bezuinigingen dreigen bepaalde activiteiten subkritisch te worden en onderwijs en onderzoek steeds meer van elkaar gescheiden te raken. Ook komt hiermee de innovatie in (en de kwaliteit van) het onderwijs en onderzoek onder druk te staan. Verder vertoont de vaste wetenschappelijke staf voor vele disciplines een onevenwichtige leeftijdsopbouw en zijn vrouwen en minderheden daarin ondervertegenwoordigd. Door de grote vraag vanuit industrie en samenleving naar goed opgeleid bèta- en technisch geschoold personeel komt het academisch loopbaanperspectief verder onder druk te staan. Intussen hebben zowel gevestigde als opkomende economieën sterk ingezet op R&D-inspanningen in de bèta en techniek, terwijl de inzet op deze gebieden in Nederland juist achterblijft. Dit alles heeft zich dan ook gemanifesteerd in een sterke neergang en ondervertegenwoordiging van de bèta- en technieksector in de Nederlandse onderzoeksportfolio gezien vanuit internationaal perspectief, met alle nodige risico's van dien voor de impact daarvan (figuur 2).



Figuur 1: De groei van het aantal ingeschreven studenten en vaste wetenschappelijke staf vanaf het ijkpunt 2009 voor de bèta (figuur 1a) en de techniek (figuur 1b). Bron: VSNU.



Figuur 2: De relatieve omvang van de Nederlandse bèta en techniek zoals gemeten met de OSI is de afgelopen jaren sterk teruggelopen tot 60 à 70% van het gemiddelde (figuur 2a). De citatie-impact van de gebieden is echter nog steeds hoog, respectievelijk 20 en 40% boven het gemiddelde. Wel is er, met name bij bèta, recent een teruggang te zien (figuur 2b). De gepresenteerde getallen zijn gebaseerd op de HOOP gebieden Natuur en Techniek, die de gehele bèta respectievelijk technieksector zoals beschreven in paragraaf 2.1 omvatten. Bron: CWTS/Rathenau.

Om de steeds verdere achteruitgang te keren, heeft het ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap (OCW) in de periode 2009-2016 een sectorplan ingesteld voor twee disciplines uit het midden van de bètasector, de natuur- en scheikunde. De implementatie van dit sectorplan onder de Commissie Breimer was een groot succes en heeft mede gezorgd voor de grote stijging in het aantal studenten over de afgelopen jaren en het afremmen van de daling in de onderzoekspecialisatie (OSI) voor de disciplines. Hiermee is een belangrijke eerste stap gezet. De Commissie Breimer heeft echter ook aangegeven dat de beschikbare middelen niet voldoende zijn om de problematiek voor deze disciplines ten volle op te lossen - laat staan dat dit zou gelden voor de gehele bèta- en technieksector. De minister van OCW onderkende dit en verzocht de Commissie Breimer in haar Wetenschapsvisie 2025 aanbevelingen op te stellen voor de versterking van de bètadisciplines, terwijl zij tevens aankondigde wetenschap en technologie via het Techniekpact te willen verankeren in het onderwijs.

Bij het verschijnen van de aanbevelingen van de Commissie Breimer in het rapport 'Koersvast' aan het einde van 2015 was duidelijk dat een eventuele opvolging hiervan niet meer onder het toen regerend kabinet zou plaatsvinden. Hetzelfde ging op voor de aanbevelingen voor verdere versterking van de wiskunde, volgend uit het kort daarvoor verschenen Deltaplan voor de Nederlandse wiskunde. Op advies van de minister van OCW zijn toen een Wiskunderaad en een Raad voor de Natuur- en Scheikunde in het leven geroepen onder de bezielende leiding van respectievelijk Frank van der Duijn Schouten en Robbert Dijkgraaf. Deze raden hadden als opdracht het gedachtegoed van de sectorplannen levend te houden en uit te zien naar kansen voor verdere versterking van de betreffende disciplines. Al gauw vonden de raden elkaar in deze opdracht en hebben ze zich gezamenlijk ingezet om het belang van de bèta en technieksectoren in hun volle breedte te bepleiten. Hierin werden zij bijgestaan door de technische universiteiten die zowel afzonderlijk als via de 4TU federatie een sterke oproep deden uitgaan om de basis van de techniek te versterken. Ook het bedrijfsleven heeft, onder andere gekanaliseerd in VNO-NCW, de noodzaak bepleit van het versterken van het bèta- en technisch onderwijs en -onderzoek voor het behoud van een gezond ondernemings- en vestigingsklimaat. Dit brede pleidooi kreeg navolging in het besluit van de minister van OCW om M€ 60 van de in het regeerakkoord beoogde investeringen in wetenschap en onderzoek te investeren in de basis van de bèta- en technische wetenschappen. Hoewel de Raad voor de Natuur- en Scheikunde alleen voor die twee disciplines al een investering van M€ 120 per jaar noodzakelijk vond, betreft het hier toch de meest significante investering die de bèta en technieksector in lange tijd heeft gezien.

Met de investering van M€ 60 wordt ingezet op een integrale aanpak over doelen op het gebied van onderzoek, onderwijs en maatschappij, gezien vanuit het perspectief van de basisdisciplines binnen de sector. Er zijn namelijk vele, met elkaar verbonden zaken die aangepakt moeten worden, zoals: een goede opleiding geven aan de stijgende studentenaantallen, aandacht besteden aan succesvolle privaat-publieke samenwerkingen, het aantal vrouwelijke hoogleraren verhogen, de interdisciplinaire maatschappelijke uitdagingen bewerken, de internationale concurrentiepositie voor het aantrekken van toptalent en het behouden van toponderzoekers versterken, alsook het versterken van de lerarenopleidingen om te zorgen voor de noodzakelijke verhoging van het aantal academisch opgeleide docenten in het voortgezet onderwijs en het hbo. Het dienen van al deze doelen is financieel en technisch alleen haalbaar als dit op een alles omvattende verbindende manier plaatsvindt. Omdat onderwijs en onderzoek zo sterk verweven zijn, biedt versterking via de disciplines de beste mogelijkheid voor succes; zo worden mensen op een herkenbare manier opgeleid en starten ze met een herkenbare 'toolbox' hun actieve werkzame leven. Het opleiden van hoge kwaliteit werktuigbouwkundige ingenieurs, wiskundigen of fysici brengt vervolgens weer een enorme stimulans in de interdisciplinaire onderzoeksprojecten. Daarin zetten zij zich namelijk elk vanuit hun eigen expertise in voor een duurzame samenleving en een hoge kwaliteit van leven. Spankracht en draagkracht gaan op deze wijze hand in hand, interdisciplinaire samenwerkingen zijn immers gebaseerd op goed toegeruste disciplinaire wetenschappelijke opleidingen.

Tegen deze achtergrond aanvaardde de kwartiermaker de opdracht om namens en met de bèta- en technieksector een beeld op te stellen van de huidige stand van zaken van de disciplines in die sectoren.

Daarbij bleken scherpe en beargumenteerde keuzes, over hoe de beschikbare middelen met maximaal rendement tot besteding kunnen worden gebracht, noodzakelijk.

### **1.3 De opbouw van de sectorbeelden**

De sectorbeelden bèta en techniek bevatten elk negen hoofdstukken, waarbij de eerste twee hoofdstukken voor bèta en techniek identiek zijn om de sterke samenhang tussen deze sectoren, zowel qua inhoud als qua problematiek, te benadrukken. In hoofdstuk 2 wordt beschreven wat in deze sectorbeelden onder bèta dan wel techniek wordt verstaan en waar de wisselwerking tussen deze twee sectoren plaatsvindt. In hoofdstuk 3 zijn de scherpe keuzes binnen de sector opgenomen en staat beschreven op welke gronden ze zijn gebaseerd. In hoofdstuk 4 staan de uitgekozen disciplines beschreven, zowel waar deze nu staan als welke uitdagingen zij zien voor de toekomst. Deze uitdagingen zijn beschreven in een beperkt aantal landelijk gedragen focusgebieden per discipline. In hoofdstuk 5 wordt een korte beschrijving gegeven van de disciplines die niet zullen participeren in de sectorplannen, maar wel integraal deel uitmaken van de sector bèta- of techniek. In hoofdstuk 6 volgt een beschrijving en motivatie van de taakverdeling over de universiteiten die aan de focusgebieden kunnen bijdragen vanuit hun lokale zwaartepunten. In hoofdstuk 7 wordt beschreven hoe de middelen het beste kunnen worden ingezet en wat de gewenste wisselwerking tussen eerste en tweede geldstroom is. In hoofdstuk 8 staat aangegeven welke vervolgstappen zijn voorzien om tot sectorplannen te komen, welke doelen met de sectorplannen worden gediend en hoe dit zich laat vertalen in SMART criteria voor de plannen van de universiteiten. Tot slot eindigt het sectorbeeld in hoofdstuk 9 met een conclusie.

### **1.4 Hoe kwamen de sectorbeelden tot stand?**

De sectorbeelden bèta en techniek zijn opgesteld in nauwe samenwerking tussen de kwartiermaker en de (vertegenwoordigende) decanen van de bèta- en techniek faculteiten, waarbij het kader van het ministerie van OCW leidend was. In navolging van uitgangspunten van de kaderbrief zijn de NWO- en KNAW instituten niet meegenomen in het proces, alsook die universiteiten die geen bèta- en/of techniekfaculteit(en) kennen. Tijdens een twee weken durende rondgang door het land is uitvoerig gesproken met de decanen, wetenschappelijk en onderwijs directeurs, alsook leidende hoogleraren van de bèta en techniefaculteiten van de universiteiten in Delft, Eindhoven, Groningen, Leiden, Maastricht, Nijmegen, Twente, Utrecht, Wageningen en de UvA en VU van Amsterdam. Alle elf universiteiten kennen al lang een vruchtbare samenwerking in het bètadecanenoverleg onder leiding van Jasper Knoester die dan ook functioneerde als primair aanspreekpunt voor het bètadomein. Binnen het techniekdomein is een techniekdecanenoverleg opgestart met vertegenwoordigers van Delft, Eindhoven, Groningen, Twente en Wageningen onder leiding van Geert Dewulf. De vertegenwoordigers in dit overleg komen momenteel uit de construerende ingenieurswetenschappen, in overeenstemming met de gemaakte keuzes (vide infra) en hebben zich in goede samenwerking en korte tijd de principes van de sectorale aanpak meester gemaakt. Naast intensief contact met deze decanenoverleggen en (de voorzitters van) nationale disciplineplatforms en -overleggen is er regelmatig gesproken met de relevante adviesstafels en besturen van NWO, de technologiecommissie van VNO-NCW, alsook vele individuele belanghebbenden in de wetenschap en maatschappij.

Om te komen tot een breed gedragen beeld van de bèta- en technieksector en gegeven de korte tijd die de kwartiermaker hiervoor ter beschikking stond, zijn delen van dit sectorbeeld opgesteld door de nationale disciplinaire overlegorganen (met name delen van hoofdstuk 4 en 5) of door de faculteiten zelf (bijlage A). Deze delen zijn vervolgens in goed overleg met de auteurs en onder regie en redactie van de kwartiermaker samengevoegd in het voorliggende sectorbeeld. Dit beeld is zowel tijdens het opstellen voor commentaar, als aan het eind ter goedkeuring, voorgelegd aan respectievelijk het bèta- dan wel techniekdecanenoverleg en aan Hans van Duijn, beoogd voorzitter van de Commissie Sectorplan Bèta en Techniek.



## 2 De uitgangspunten van de sectorbeelden

### 2.1 Wat is bèta en wat is techniek?

De uitersten van de bèta en techniek zijn eenvoudig tegenover elkaar te stellen door de stereotypen hieruit over te nemen. We vinden dan aan de bèta kant een Albert Einstein of John Charles Fields en aan de kant van de techniek een Elon Musk of Simon Stevin. De werkelijkheid is uiteraard genuanceerder. Door de toenemende vraag naar multidisciplinaire teams om complexe wetenschappelijke of maatschappelijke vraagstukken aan te pakken zijn disciplinegrenzen aan het vervagen. Door de toenemende aandacht voor valorisatie en kennisbenutting is menig bètawetenschapper naar de techniek geschoven, terwijl anderzijds het innoverend vermogen van precisieinstrumentatie en -fabricatie de bètawetenschapper in menig technicus naar boven heeft gehaald.

Om toch een helder onderscheid tussen beide sectoren aan te brengen wordt de volgende definitie gehanteerd: het onderzoek binnen de **bètawetenschappen** richt zich op het verleggen van de grenzen van onze kennis van de natuur. Dit omvat zowel de empirische wetenschap waar met behulp van proefondervindelijke methodes gezocht wordt naar natuurwetten en verklaringen van natuurverschijnselen, alsook de delen van de formele wetenschappen waar men ditzelfde probeert te doen op basis van deductie en logica. Dit vertaalt zich in zowel nieuwsgierigheidsgedreven fundamenteel onderzoek, als in toepassingsgericht onderzoek waarbij op voorhand al bedacht is hoe de ontwikkelde kennis van nut kan zijn. Het onderzoek binnen de **technische wetenschappen** vertaalt nieuwe (natuurwetenschappelijke) kennis naar kunde, gericht op de ontwikkeling van (technische) producten, systemen en processen. De technische wetenschappen richten zich dus op kennisontwikkeling voor het creëren van concrete ontwerpen. Dit is ongeacht of deze ontwerpen hun toepassing vinden in het nieuwsgierigheidsgedreven fundamenteel onderzoek (bijvoorbeeld detectoren voor zwaartekrachtsgolven of nieuwe vormen van regeltechniek voor een fusiereactor) of in commercieel gerichte toepassingen (bijvoorbeeld nieuwe vliegtuigmotoren of machines om computerchips mee te fabriceren).

Met deze definitie vallen de disciplines in het bètatechnisch domein als volgt in te delen: de bètawetenschappen omvatten de aard- en milieuwetenschappen, astronomie, biologie, farmacie, informatica, natuurkunde, scheikunde en wiskunde. Hiermee wordt ook recht gedaan aan de indeling van de brede bètafaculteiten (gecoördineerd door het bètadecanenoverleg) waar deze disciplines al jaren worden bewerkt en onderwezen. De technische wetenschappen omvatten de bouwkunde, civiele techniek, elektrotechniek, industrieel ontwerp, lucht- en ruimtevaarttechniek, levensmiddelen- en landbouwtechnologie, technische bedrijfswetenschappen, transport-, vervoer en maritieme techniek en werktuigbouwkunde. Deze zijn primair geconcentreerd in faculteiten van de 4TU, al is er een groeiende aandacht voor deze onderwerpen bij enkele algemene universiteiten – in het bijzonder de RUG.

Met nadruk wordt gewezen op de sterk inhoudelijke wisselwerking tussen de bèta- en techniekdisciplines in het realiseren van wetenschappelijke, maatschappelijke en industriële uitdagingen. Enkele treffende voorbeelden in de wetenschap zijn te vinden in het maken en gebruiken van apparatuur zoals telescopen, satellieten en versnellers, maar ook in spectrometers, scanners en microscopen. Voor bijdragen aan maatschappelijke uitdagingen kan bijvoorbeeld gedacht worden aan de energietransitie, waar nieuwe wetenschappelijke kennis wordt ontwikkeld om elektriciteit efficiënt in CO<sub>2</sub>-neutrale brandstoffen om te zetten, maar waar de vooruitgang in de techniek bepaalt of het uiteindelijk deze brandstoffen zullen zijn of wellicht de elektriciteit zelf die onze voertuigen zullen aandrijven. Ook in de industrie is deze samenhang duidelijk, bijvoorbeeld in het samenspel van de ontwikkelingen in robotica (techniek) en de vooruitgang in kunstmatige intelligentie (bèta) die vervolgens samen leiden tot vernieuwing in fabricageprocessen.

Deze inhoudelijke wisselwerking is gebaseerd op sterke (sub)disciplines die traditioneel de basis vormen van de wetenschap en de techniek. Het zijn dan ook deze basis-(sub)disciplines die borg staan voor een gedegen opleiding in zowel de bachelor-, de master- en promotieopleidingen.



## 2.2 Gedeelde problematiek en een gedeelde oplossing

Naast de sterke inhoudelijke wisselwerking tussen de bèta en techniek is er ook sprake van een gedeelde problematiek die beide sectoren ondervinden, die in alle gevallen heeft geleid tot een verhoogde werkdruk van de huidige wetenschappelijke staf. Zoals in het vorige hoofdstuk beschreven hebben zowel de bèta- als techniefaculteiten de laatste jaren te maken gehad met een grote toestroom van studenten en daarbij achterblijvende omvang van de wetenschappelijke staf. Ook hebben beide te maken met een variërende personeelsopbouw, zowel qua leeftijd, gender, als nationaliteit. Daarnaast worden bèta en techniek geconfronteerd met een toenemende inzet op de sector in zowel gevestigde als opkomende economieën en een achterblijvende inzet vanuit Nederland hierop, met duidelijke gevolgen voor de internationale concurrentiekracht. Tot slot hebben beide sectoren nu nog steeds een zeer hoge wetenschappelijke impact met een citatiescore die voor de bèta veertig procent en voor de techniek twintig procent boven het mondiaal gemiddelde ligt, maar deze impact neemt de laatste jaren langzaam af.

Het ligt dan ook voor de hand om voor bèta en techniek een soortgelijke oplossingsrichting te zoeken, waarbij voortgebouwd kan worden op de succesvolle koers van de Commissie Breimer om via een integrale aanpak de met elkaar vervlochten problematiek in beide sectoren aan te pakken. Anders dan binnen de bèta, waar de natuur-, schei- en wiskunde al enige ervaring hebben met een sectorplan, is deze voor de techniek geheel nieuw. Bij de totstandkoming van beide sectorbeelden heeft de technieksector echter bewezen deze uitdaging snel en adequaat op te kunnen pakken. Daarbij zijn wanneer dat mogelijk en wenselijk was vanuit de bètasector enige handreikingen gedaan.

## 2.3 Inhoudelijke verdeling van en binnen de bèta en techniek

De opdeling van bèta en techniek volgens bovenstaande definitie, ondanks de beschreven nauwe verwevenheid in zowel onderzoek als onderwijs, is gemaakt op basis van de kaderbrief en na onderling overleg van de decanen en de nationaal georganiseerde disciplinaire overlegorganen. Hierin is besloten om de bètadisciplines van de technische universiteiten (technische natuurkunde, chemische technologie, et cetera) te betrekken bij de bètadisciplines van de algemene universiteiten. Deze keuze werd ingegeven door de bewezen samenwerking in het bètadecanenoverleg en de wens om tot een nationale strategie per discipline te komen. Hier geldt ook dat de traditionele grenzen, tussen de meer toegepaste of technische bètawetenschappen en de bètawetenschappen zoals gedoceerd en onderzocht aan de algemene universiteiten, aan het vervagen zijn. Deze verschuiving heeft ook gevolgen voor de verdeling van middelen, zoals beschreven in paragraaf 2.5.

Wat de keuzes binnen de sectoren betreft heeft OCW voor de bètasector al aangegeven dat deze beperkt moesten worden tot de disciplines informatica, natuurkunde, scheikunde en wiskunde. Voor de sector techniek was een dergelijke inperking op voorhand niet gemaakt, maar werd wel gevraagd om scherpe keuzes. Na consultatie van externe partners (VNO-NCW en enkele individuele bedrijven) en het bestuderen van de noden in de technische wetenschappen aan de universiteiten, is voor de sector techniek gekozen voor de construerende ingenieurswetenschappen. Deze keuze is ingegeven door het grote belang van deze ingenieurswetenschappen voor de Nederlandse (maak)industrie en de grote maatschappelijke uitdagingen, alsmede de grote druk waaronder deze – meer nog dan de ontwerpende ingenieurswetenschappen – zijn komen te staan door de toegenomen studentenaantallen en de achtergebleven investeringen in onderzoeksapparatuur en -infrastructuur. De keuze beperkt zich tot de disciplines elektrotechniek, civiele techniek en werktuigbouwkunde, die de basis vormen van de construerende technische wetenschappen. Ook worden hierin die delen van de lucht- en ruimtevaarttechniek (TUD) meegenomen, die onder de werktuigbouwkunde te scharen zijn. Een nadere beschrijving en motivatie van de gekozen disciplines is voor bèta en techniek apart opgenomen in hoofdstuk 3 van het betreffende sectorbeeld.

## 2.4 Kengetallen van de bèta en techniek

Bij het opstellen van de sectorbeelden zijn de bèta- en techniekfaculteiten gevraagd om een beeld te schetsen voor de uitgekozen disciplines met daarin een beschrijving van de huidige situatie en hun visie op de toekomst. Voor dat laatste zijn landelijke afspraken gemaakt over de voorziene ontwikkelingen en hieruit voortvloeiende groeiverwachtingen en investeringen via de sectorplannen. Deze inventarisatie heeft ook geleid tot het verkrijgen van cijfermateriaal over de aantallen bachelor- en masterstudenten en over vaste (hoogleraren, UHDS en UDs) en tijdelijke (promovendi en postdocs) staf. Deze individuele cijfers zijn per sector samengebracht in tabel 1. Tabel 1 kent eveneens een voorspelling van de gewenste omvang in 2024: het moment waarop deze sectorplannen structureel moeten worden binnen de faculteiten. De cijfers zijn richtinggevend voor de ambities die de faculteiten zullen formuleren in hun profileringsplannen. Een nadere uitsplitsing van deze cijfers per discipline kan gevonden worden in hoofdstuk 4. Opgemerkt moet worden dat de cijfers hier een indicatie geven, maar in de individuele profileringsplannen een meer definitieve status krijgen. De tijd waarin dit sectorbeeld tot stand moest komen was te kort om tot een volledige overeenstemming over de wijze van rapporteren te komen alsook tot een gedetailleerde inschatting voor 2024.

Uit de cijfers blijkt een blijvende ambitie om de studentenaantallen verder te laten toenemen, conform de vraag vanuit maatschappij en bedrijfsleven om meer hoog opgeleide bèta en technisch personeel. Gezien de discussie rondom numeri fixi en de student-stafverhouding wordt deze ambitie alleen mogelijk gemaakt door de investeringen in vaste wetenschappelijke staf uit de sectorplannen. Verder is er in de cijfers van bèta een vrij grote stap van BSc naar MSc te zien. Deze kan deels toegeschreven worden aan de zeer snelle groei van de BSc in de afgelopen jaren, alsook de brede uitstroom vanuit de BSc naar MSc opleidingen buiten het bètadomein. Ook voor het aandeel vrouwelijke studenten en staf is groei voorzien. Als de verbetering in de genderverhouding wellicht klein lijkt, moet de lezer zich realiseren dat de voorziene verhoging van het percentage vrouwen in de vaste wetenschappelijke staf alleen mogelijk is door het voornemen om een bijna gelijk aantal mannen en vrouwen aan te nemen voor de nieuwe stafposities. Met dit voornemen tonen de domeinen hun uiteindelijke streefdoel aan van een vergelijkbare man-vrouwverhouding over de gehele linie van bachelor, master, promovendus, *tenure track* en hoogleraar. Hierbij moet uiteraard wel de tijdsvertraging in ogenschouw genomen worden die het gevolg is van de zittingsduur van al aangestelde staf

Tabel 1: Aantallen studenten en stafleden.\*

	BÈTA				TECHNIEK			
	2016 (%V)	2017 (%V)	2018 (%V)	2024 (%V)	2016 (%V)	2017 (%V)	2018 (%V)	2024 (%V)
# INSTROOM BSC	6.694 (27)	7.118 (27)	7.703 (29)	9.522 (34)	3.162 (18)	3.309 (18)	3.409 (20)	4.169 (25)
# TOTAAL BSC	17.834 (25)	19.534 (26)	21.249 (28)	27.470 (33)	9.329 (17)	9.560 (18)	9.866 (18)	12.057 (22)
# INSTROOM MSC	3.901 (28)	4.263 (28)	4.672 (29)	6.652 (34)	2.757 (20)	2.979 (20)	3.042 (20)	3.858 (25)
# TOTAAL MSC	9.461 (28)	10.633 (27)	11.789 (27)	15.554 (33)	7.864 (18)	8.374 (19)	8.850 (19)	10.853 (24)
WP VAST (FTE)	1.427 (15)	1.456 (15)	1.539 (16)	1.901 (24)	630 (14)	666 (13)	692 (14)	878 (19)
WP TIJDELIJK (FTE)	4.331 (28)	4.428 (29)	4.482 (29)	5.503 (33)	2.150 (25)	2.415 (23)	2.442 (23)	2.762 (27)

\* Deze getallen zijn de som van de getallen opgegeven door de faculteiten en gebaseerd op de door hen geregistreerde en in 2024 verwachte studenten- en stafaantallen in de gekozen disciplines.

## 2.5 Middelenverdeling over de bèta en techniek

In het door OCW aan de kwartiermaker meegegeven kader staan de uitgangspunten voor de verdeling van middelen over de bèta en techniek, waarbij in eerste instantie een gelijke verdeling over beide sectoren is aangehouden met een marge van circa 25%. De kwartiermaker heeft echter het benodigde mandaat ontvangen om in goed overleg met het veld tot een andere indeling van deze sectoren te komen, met gevolgen van dien voor de middelenverdeling. De beschreven opdeling van wat tot bèta en wat tot techniek wordt gerekend en de keuze om de bètadisciplines van de technische universiteiten integraal onderdeel te laten zijn van het sectorplan bèta, vraagt om een dergelijke aanpassing. In samenspraak met de decanen is gekozen om M€ 40 aan het sectorplan bèta en M€ 20 aan het sectorplan techniek toe te wijzen.

Deze verdeling is goed te rechtvaardigen op basis van de kengetallen in tabel 1, die een verhouding van circa 2:1 laten zien voor de studenten- en stafaantallen van de disciplines gerekend tot respectievelijk het sectorplan bèta en het sectorplan techniek. De verdeling wordt verder ondersteund door het inzicht dat het toerekenen van de technische informatica, natuur-, schei-, en wiskunde aan het techniekplan een verhouding in deze kengetallen van circa 2:3 voor de algemene- versus de technische universiteiten zou opleveren. Naast het feit dat hiermee het inhoudelijke werk van de bètadecanen over de afgelopen tien jaar teniet zou worden gedaan, zal een dergelijke indeling bij gelijke budgetten voor beide plannen veel druk zetten op het budget voor de geprioriteerde techniekdisciplines, en ook een scheve verhouding tussen de algemene en de technische informatica, natuur-, schei-, en wiskunde veroorzaken.

Met de nu gekozen indeling is dus jaarlijks M€ 40 beschikbaar voor de vier bètadisciplines, inclusief die van de technische universiteiten, en M€ 20 voor de drie techniekdisciplines. Een verdere uitwerking van dit budget over de betreffende disciplines is beschreven in hoofdstuk 3. Van dit budget is conform de kaderbrief tachtig procent rechtstreeks beschikbaar voor de eerste geldstroom, te verdelen op basis van de profileringsplannen van de universiteiten door de Commissie Van Duijn. De overige twintig procent zal via NWO worden ingezet ter versterking van de universitaire plannen, zoals beschreven in hoofdstuk 7. Verder is er sprake van een aanlooperperiode over 2018 en 2019, waarbij al M€ 47 aan de eerste geldstroom en M€ 30 aan de tweede geldstroom ter beschikking is gesteld. Deze keuze heeft tot gevolg dat er over de rest van de looptijd van het sectorplan (2020-2024) jaarlijks M€ 51,4 binnen de eerste geldstroom en M€ 8,6 binnen de tweede geldstroom beschikbaar is. Conform de 2:1 verhouding zal van het eerste-geldstroomdeel M€ 34,4 tot besteding worden gebracht in het sectorplan bèta en M€ 17 in het sectorplan techniek. Vergelijkbaar zal van het tweede-geldstroomdeel M€ 5,6 via het NWO ENW-domein en M€ 3 via het NWO TTW-domein beschikbaar worden gesteld voor de versterking van respectievelijk het sectorplan bèta dan wel techniek. Voor de middelen van de aanlooperperiode geldt een soortgelijke verdeling, zoals ook weergegeven in tabel 2.

*Tabel 2: Verdeling van middelen over bèta en techniek en over de eerste en tweede geldstroom gedurende de looptijd van de sectorplannen.*

	Sectorplan bèta (M€)		Sectorplan techniek (M€)	
	Eerste geldstroom (universiteiten)	Tweede geldstroom (ENW)	Eerste geldstroom (universiteiten)	Tweede geldstroom (TTW)
2018	0	19	0	11
2019	31,3	0	15,7	0
2020	34,4	5,6	17	3
2021	34,4	5,6	17	3
2022	34,4	5,6	17	3
2023	34,4	5,6	17	3
2024	34,4	5,6	17	3

## 2.6 Inzet van de middelen

Om het hoofd te kunnen bieden aan de beschreven problematiek in de sectoren zullen de middelen voornamelijk moeten worden ingezet om posities voor nieuwe vaste wetenschappelijke stafleden te creëren. Deze moeten immers de meeste ambities op de gebieden van onderzoek, onderwijs en maatschappelijke doelen waarmaken, alsook de meer specifieke doelen per sector en discipline zoals beschreven in de volgende hoofdstukken. Om te komen tot een doelgerichte investering met de nodige kritische massa zullen deze posities worden ingezet binnen een geselecteerd aantal focusgebieden in de geprioriteerde disciplines binnen bèta en techniek. De focusgebieden zijn geselecteerd op basis van hun belang voor de toekomstige wetenschappelijke en maatschappelijke uitdagingen én de mogelijkheid van de Nederlandse universiteiten om zich hierin internationaal te onderscheiden.

Bij de invulling van deze nieuwe posities wordt gestreefd naar een goede balans van invulling op senior hoogleraar niveau en het meer junior *tenure track* niveau, en het verbeteren van de genderbalans. De sectoren bèta en techniek kennen experimentele en theoretische stafleden. Om talent te behouden en aan te trekken is er grote behoefte om deze injectie in de vaste staf gepaard te laten gaan van een investering in startpakketten. Hiermee wordt de wervingskracht voor de nieuwe posities vergroot. De nieuw aangestelde stafleden kunnen een vliegende start maken in het opbouwen van hun groep en het focusgebied waarin ze zijn aangesteld versterken. Bij de startpakketten gaat het om middelen voor gebruiksartikelen, reis en publicatiefondsen, apparatuur, infrastructuur en waar mogelijk tijdelijke wetenschappelijke posities (promovendi en postdocs). Bovenstaande overwegingen hebben geleid tot het instellen van een viertal tarieven die de integrale kosten van de posities goed benaderen, en die door de universiteiten gehanteerd zullen worden in de in te dienen plannen:

- Experimentele posities in de bèta en de techniek:
  - senior hoogleraar positie: 250.000 euro per jaar structureel;
  - junior *tenure track* positie: 150.000 euro per jaar structureel.
- Theoretische posities in de bèta en de techniek:
  - senior hoogleraar positie: 180.000 euro per jaar structureel;
  - *junior tenure track* positie: 120.000 euro per jaar structureel.

De posities zullen door de universiteiten in hun plannen worden aangevraagd op basis van landelijke afspraken over zwaartepuntvorming binnen de focusgebieden. De Commissie Van Duijn zal deze plannen beoordelen op basis van de ambitie die eruit spreekt en de kracht (omvang en kwaliteit) van de betreffende faculteit in de aangegeven focusgebieden. De bedragen zijn al beschikbaar per 1 januari 2019 en worden in de zomer van 2019 door de minister van OCW met terugwerkende kracht beschikbaar gesteld op basis van de prioritering door de Commissie. De daarop volgende periode van monitoring gedurende zes jaar met een sterke tussentijdse- en eindevaluatie zal de faculteiten scherp houden op de zelf gekozen prioriteiten. Als de uitvoering aan het einde van deze periode volgens de Commissie naar ieders wens is verlopen, zal deze de minister van OCW adviseren om de toezeggingen structureel in te laten dalen in de reguliere bekostiging middels de eerste geldstroom. Daarbij zullen de betrokken universiteiten zich er wel aan moeten committeren dat de middelen ten goede komen aan de structurele versterkingen van de geprioriteerde focusgebieden.

Naast de hoofdzakelijke inzet op nieuwe vaste stafposities is het raadzaam om een deel van de middelen centraal te gebruiken voor doelen als *outreach* naar het primair en voortgezet onderwijs of het verbeteren van de opzet en vergroten van de werfkracht van de lerarenopleiding (voor vwo en hbo). Hiertoe zullen de decanenoverleggen naast de plannen vanuit de eigen instelling ook een gezamenlijk plan voor de gehele bèta- respectievelijk technieksector aanleveren bij de Commissie. Het plan moet een concrete aanpak voor deze gezamenlijke doelen omvatten met een daarbij passende begroting. Deze vervolgstappen zijn meer in detail uitgewerkt in hoofdstuk 8. De nu volgende hoofdstukken zijn specifiek voor het sectorbeeld bèta, en gaan dieper in op de gemaakte keuzes binnen het bètadomein. Eenzelfde beschrijving voor de techniek is in het sectorbeeld techniek opgenomen.

## 3 Specifieke aandachtspunten voor de bètasector

### 3.1 Belang en kenmerken van de bètawetenschappen

Zoals in hoofdstuk 2 beschreven richten de bèta- of natuurwetenschappen zich op het verleggen van de grenzen van onze kennis van de natuur, zowel ingegeven door nieuwsgierigheid als door beoogde toepassingen. Hiermee staan de bètawetenschappen centraal in het beantwoorden van existentiële vragen, zoals het ontstaan van het leven of de toekomst van het heelal. Daarnaast liggen ze ten grondslag aan vernieuwingen in de voor de Nederlandse economie zo belangrijke maakindustrie. Ook zijn ze onontbeerlijk voor het oplossen van grote maatschappelijke vraagstukken op gebieden als klimaat, duurzaamheid en kwaliteit van leven. Ze zijn één van de motoren voor welzijn en welvaart in ons land.

Kenmerkend voor de natuurwetenschappen is een grote verwevenheid van het academisch onderwijs en onderzoek. Vaak worden studenten al vanaf de bachelorfase betrokken in onderzoek door het uitvoeren van kortlopende onderzoeksprojecten aan de vakgroepen. In de master- en promotiefase ontstaat in toenemende mate een 'meester-gezel' relatie tussen docent en student, als het onderwijs voor een groot deel bestaat uit het gezamenlijk opzetten en uitvoeren van onderzoek. Hierbij krijgt de student hands-on uitleg en begeleiding van de docent-onderzoeker en kan deze vice versa deeltaken uitbesteden aan de student en inspiratie opdoen uit de wisselwerking. Een dergelijke integratie van onderwijs en onderzoek stelt overigens wel een bovengrens aan de student-staf verhouding.

Typerend is verder de vormende werking van de natuurwetenschappen in het basis en voortgezet onderwijs. De scholing in het vermogen om logisch te redeneren, problemen van verschillende kanten te benaderen, modellen op te stellen en de tekortkomingen hiervan te zien, in combinatie met vaardigheden in ICT en apparatuur in laboratoria of observatoria, maakt dat afgestudeerden van een bètaopleiding gretig aftrek vinden in industrie en maatschappij.

Tot slot bestaat binnen de bètawetenschappen een sterke traditie van samenwerken. Deze wordt gevoed door de onderlinge afhankelijkheid van onderzoekers en disciplines binnen het bètadomein bij het beantwoorden van de grote onderzoeksvragen. Dit komt met name tot uitdrukking rondom grootschalige apparatuur of infrastructuur (bijvoorbeeld bij CERN), maar geldt ook op het niveau van de zogenaamde *table-top* experimenten en de theorie, waar men in het eigen onderzoek rechtstreeks verder bouwt op elkaars experimenten, ideeën, of modellen. Deze traditie van samenwerken gaat over grenzen heen, maar komt ook op nationaal niveau tot uitdrukking in diverse disciplinaire en thematische overlegorganen.

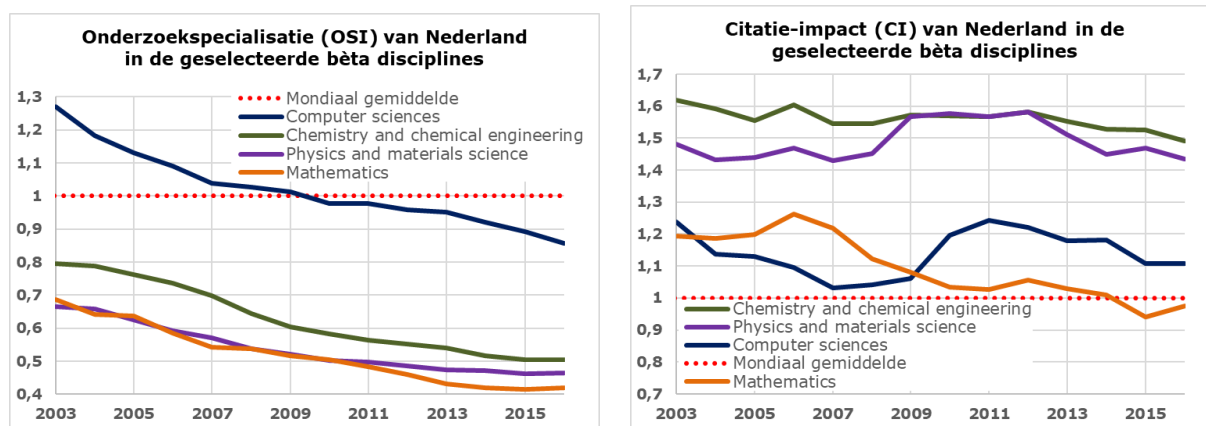
### 3.2 Disciplinaire basis en scherpe keuzes

De traditionele basis van de bètawetenschappen, zoals ook onderwezen aan de middelbare school, bestaat uit de natuur-, schei-, wiskunde en biologie, en in toenemende mate de informatica. Andere relevante disciplines binnen het bètadomein zijn de aard- en milieuwetenschappen, astronomie en farmacie. Bovenop deze disciplinaire basis zijn thematische verbanden de laatste jaren steeds belangrijker geworden; voorbeelden hiervan zijn het onderzoek in de levenswetenschappen of het energie- en klimaatonderzoek. Ook zijn er op de raakvlakken van disciplines veel ontwikkelingen geweest, zoals de opkomst van de biochemie of de astrofysica. Deze ontwikkelingen steunen en bouwen voort op de basisdisciplines waarbinnen het onderzoek en onderwijs aan de universiteiten is ingedeeld.

Naast het toenemend belang van samenwerkingsverbanden voor grote wetenschappelijke, maatschappelijke en industriële uitdagingen, hebben de bètawetenschappen de afgelopen jaren te maken gekregen met een grote toename van de studentenaantallen (zie figuur 1 in hoofdstuk 1). Gegeven de blijvend sterke vraag vanuit industrie en maatschappij naar goed opgeleide bètawetenschappers is dit een gunstige ontwikkeling. De combinatie van deze twee factoren heeft er echter toe geleid dat het onderzoek en onderwijs aan de basis van het bètadomein in toenemende mate onder druk is komen te staan. Hierdoor

is er minder ruimte om te werken aan de vraagstukken die de basis vormen voor de kennis die nodig is voor de maatschappelijke uitdagingen van morgen, loopt Nederland het risico talent te verliezen aan het buitenland en komt ook het vestigingsklimaat voor de maakindustrie in het geding.

Om maximaal rendement te halen uit de middelen die met het regeerakkoord beschikbaar zijn gesteld is het noodzakelijk om scherpe keuzes te maken binnen het brede bètadomein. Het ministerie van OCW heeft in haar kaderbrief aangegeven dat de sectorgelden worden toebedeeld aan de informatica en de natuur-, schei- en wiskunde. Deze keuze is mede ingegeven door de sterke terugloop van de onderzoekspecialisatie van Nederland in de betreffende disciplines (figuur 3a) – met de nodige risico's voor de internationale concurrentiekracht of de mogelijkheden om vanuit deze disciplines aan maatschappelijke en industriële uitdagingen bij te dragen. Daarbij komt dat het juist deze disciplines zijn die aan de basis staan van de maakindustrie (onder andere ASML, NXP, Philips, Shell, Unilever, VDL, maar ook veel MKB) en het merendeel van de maatschappelijke uitdagingen (veiligheid, gezondheid, klimaat, energie). Ook zijn ze onmisbaar in de verdere ontwikkeling van andere wetenschapsgebieden (bijvoorbeeld *big data* en AI voor beeldherkenning, of de ontwikkeling van nieuwe materialen voor de volgende generatie detectoren en telescopen). De terugloop in onderzoekspecialisatie heeft ook gevolgen voor de kwaliteit. Hoewel de citatie-impact van deze wetenschapsgebieden nog steeds hoog is, lopend vanaf het wereldgemiddelde (wiskunde) tot vijftig procent boven het wereldgemiddelde (scheikunde), is hierin de laatste jaren een neergang te zien (figuur 3b).



Figuur 3: De relatieve omvang van de Nederlandse informatica, natuur-, schei- en wiskunde zoals gemeten met de OSI is de afgelopen jaren sterk teruggelopen – voor wiskunde zelfs tot amper veertig procent van het gemiddelde (figuur 3a). De citatie-impact van de gebieden is echter nog steeds hoog, maar vertoont inmiddels ook een duidelijke teruggang (figuur 3b). Bron: CWTS/Rathenau.

Daarnaast geldt dat juist de informatica en de natuur-, schei- en wiskunde zich door hun hoge landelijke organisatiegraad bij uitstek lenen voor een succesvolle sectorale aanpak. Deze organisatie komt bijvoorbeeld tot uitdrukking in landelijke overlegorganen zoals het Informatica Platform Nederland, Platform Academische Natuurkunde en Platform Wiskunde Nederland die bottom-up voeding geven aan het bèta-decanenoverleg door nationaal afgestemde strategische beslissingen over onderzoek en master en promotie onderwijs, en in adviesraden zoals de Raad voor de Natuur- en Scheikunde en de Wiskunderaad die als belangenbehartigers van de disciplines kunnen optreden naar politiek en maatschappij.

De keuze voor de informatica, natuur-, schei- en wiskunde impliceert dat de disciplines aard- en milieuwetenschappen, astronomie, biologie en farmacie, die wel volledig in het bètadomein thuishoren, geen onderdeel uit zullen maken van het komende sectorplan. Volledigheidshalve zijn deze disciplines in hoofdstuk 5 van dit sectorbeeld beschreven. Van de thematische benaderingen zoals levenswetenschappen, klimaat en energie, zijn die delen die vallen binnen de natuur-, schei-, wiskunde en informatica wel meegenomen. Het betreft hier bijvoorbeeld de moleculaire levenswetenschappen, klimaatfysica, of het funderend energieonderzoek.



### 3.3 Integrale versterking van de disciplines

De gedeelde problematiek van de informatica, natuur-, schei- en wiskunde zoals beschreven in paragrafen 2.2 en 3.2 biedt als kans dat de disciplines gezamenlijk kunnen werken aan oplossingen terwijl ze nieuwe inzichten en *best practices* met elkaar delen. Dat de disciplines elkaar hierin kunnen versterken is al bewezen met de gezamenlijke aanpak van de natuur- en scheikunde in het eerste sectorplan en in het eensgezinde optrekken van de Raad voor de Natuur- en Scheikunde met de Wiskunderaad.

Als eerste stap naar samenwerken hebben de disciplines elk hun wetenschappelijke uitdagingen en ambities voor de toekomst beschreven en deze focusgebieden met elkaar gedeeld, zoals weergegeven in hoofdstuk 4. Dit zal leiden tot (hernieuwde) nationale taakverdeling over, en concentratie van onderzoek in zwaartepunten bij universiteiten. Door het creëren van nieuwe stafposities in de zwaartepunten wordt de basis van de disciplines toekomstbestendig gemaakt en een sterke uitgangspositie voor verdere interdisciplinaire samenwerkingsverbanden gecreëerd. Met de financiering per positie wordt ruimte gecreëerd voor competitieve startpakketten die bijdraagt aan het versterken van de internationale concurrentiepositie van de disciplines. Aanpalend zullen de budgetten in de tweede geldstroom worden verhoogd voor de gekozen focusgebieden en de aan te stellen wetenschappers, zoals beschreven in hoofdstuk 7.

Daarnaast wordt ingezet op het versterken van de verbinding van onderzoek en onderwijs. Dit betreft in het bijzonder de koppeling van de gedefinieerde zwaartepunten in onderzoek met het aanbod aan master opleidingen of *mastertracks*, zodat een 'Universiteit van Nederland' ontstaat. Verder zullen de sectorplanmiddelen worden aangewend voor de noodzakelijke *outreach* naar het primair en voortgezet onderwijs, om zo het aantal studenten in de natuurwetenschappen op niveau te houden en waar mogelijk te verhogen. Specifieke maatregelen moeten bijdragen aan het verbeteren van het aandeel vrouwen en minderheden in de studentenpopulatie. Ook wordt ingezet op een verbetering van de opzet en vergroting van de werfkracht van de lerarenopleiding, zodat het aantal academisch geschoolde docenten in het voortgezet onderwijs significant zal stijgen.

Tot slot zullen de versterkingen in de onderzoekszwaartepunten worden ingezet om een sterke basis te creëren voor participatie in strategische programmering voor maatschappij en innovatie overeenkomstig de NWA en in een versterking van de publiek-private samenwerkingen conform het missiegedreven innovatiebeleid en aansluitend bij de topsectoren.

Om al deze ambities ten volle waar te maken is het beschikbare budget onvoldoende: de Commissie Breimer berekende immers in 2016 al een jaarlijks bèta-(investerings)gat van M€ 270 voor de natuur- en scheikunde. Toch zal met M€ 40 een aanzienlijke stap in de goede richting kunnen worden gezet als alle betrokkenen zich voor de bovenstaande doelen inspannen. Om een helder kader te bieden aan de universiteiten voor het opstellen van hun plannen is in tabel 3 al een verdeling van het budget over de disciplines gemaakt. Deze onderverdeling is een afspiegeling van vele factoren, zoals de hierboven beschreven problematiek en ambities, voorziene uitdagingen voor de toekomst, experimenteel dan wel theoretisch karakter van de disciplines met al dan niet bijbehorende behoefte aan infrastructuur, huidige aantallen staf en studenten en de daarin voorziene groei, en tenslotte een inschatting van de mogelijkheid om de beschikbare posities op adequate wijze in te vullen gedurende de komende jaren. Bij de verdeling is uitgegaan van het jaarlijkse eerste-geldstroombudget in de periode 2020-2024 (M€ 34,4 – zie tabel 2 in hoofdstuk 2). Gemiddeld zal deze investering leiden tot een vergroting van de wetenschappelijke staf van circa 10 – 20%. Na advies van de Commissie Van Duijn zullen deze middelen vanaf 2025 in de eerste en tweede geldstroom indalen.

De in tabel 3 genoemde budgetten zijn totalen per discipline en bevatten zowel de middelen voor posities als voor de centrale doelen zoals beschreven in paragraaf 2.6. Daarnaast zullen in de tweede geldstroom middelen worden ingezet voor flankerend beleid zoals beschreven in hoofdstuk 7.



*Tabel 3: Verdeling van de eerste-geldstroommiddelen over de disciplines.*

<b>Discipline</b>	<b>Jaarlijks beschikbaar in eerste geldstroom</b>
Informatica	€ 8.400.000,=
Natuurkunde	€ 10.000.000,=
Wiskunde	€ 6.000.000,=
Scheikunde	€ 10.000.000,=
<b>Totaal per jaar 2020-2024</b>	<b>€ 34.400.000,=</b>
<b>Opstartjaar 2019 (91,28%)</b>	<b>€ 31.400.000,=</b>

## 4 Beschrijving van de geprioriteerde disciplines

### 4.1 Landschapsanalyses en toekomstbeelden

In nauwe samenspraak met de nationale overlegorganen is voor elk van de geprioriteerde disciplines informatica, natuur-, schei-, en wiskunde een beschrijving opgesteld van het huidige academische landschap. Hierbij hebben de faculteiten kengetallen aangeleverd over student- en stafomvang, die in dit hoofdstuk per discipline zijn weergegeven. Ook hebben de nationale overlegorganen een omgevingsanalyse gemaakt en een toekomstvisie opgesteld. Deze toekomstvisie heeft de vorm van focusgebieden, waarbinnen spannende ontwikkelingen zijn voorzien en de Nederlandse universiteiten een significante bijdrage zouden kunnen leveren. Op basis hiervan zijn vervolgens per discipline landelijk gedragen profileringsplannen opgesteld. Deze zijn beschreven in hoofdstuk 6.

### 4.2 Informatica

#### 4.2.1 Universitaire landschap

Informatica is de wetenschap van het verwerken van informatie door machines. In haar kern liggen algoritmes, die de basis vormen voor onder andere software, artificiële intelligentie, *data science* en computersystemen. Informatica is essentieel voor innovaties in veel andere disciplines. Het is evident dat deze innovaties met informatica niet zonder innovaties in informatica kunnen. Uit alle internationale onderzoekswisitaties blijkt telkens opnieuw dat de informaticawetenschap in Nederland in topvorm is, maar in relatieve omvang afneemt (zie figuur 3 in hoofdstuk 3).

De Nederlandse informatica heeft een lange traditie van nationale samenwerking. De informatici zijn goed georganiseerd in het ICT-onderzoek Platform Nederland (IPN). Ook zijn er intensieve samenwerkingen op specifieke deelgebieden, zoals de nationale cyber-security-raad, de al lang bestaande BNVKI voor kunstmatige intelligentie, de drie nauw samenwerkende informatica onderzoeksscholen (ASCI, IPA, SIKS) en de lokale en interlokale initiatieven voor onderzoek- en onderwijsafstemming (zoals NIRICT tussen de drie technische universiteiten en ADS in de Amsterdamse cluster). Daarnaast geven onder andere COMMIT en COMMIT2DATA vorm aan publiek-private samenwerking tussen informatici en bedrijven. De kwaliteit van het informaticaonderzoek is excellent en van wereldniveau (informatica onderzoekswisitatierapport 2016). Veel universiteiten weten de eerste geldstroom (meer dan) te verdubbelen uit andere nationale en internationale geldstromen.

In onderstaande tabel zijn de kengetallen en ambities betreffende het informatica onderwijs en onderzoek weergegeven, op basis van de opgave vanuit de participerende universiteiten. Dit betreft LEI, RU, RUG, TUD, TU/e, UvA, UM, UT, UU en VU. Deze universiteiten zijn geselecteerd op basis van de aanwezigheid van een bètafaculteit of -faculteiten en de van daaruit geleverde inspanningen op het gebied van de kerninformatica, dat wil zeggen het informaticaonderzoek om de informatica als discipline verder te ontwikkelen. Het informatica onderzoek aan de WUR wordt niet gerekend tot de kerninformatica zoals hier beschreven, maar heeft een meer toegepaste en in de levenswetenschappen geïntegreerd rol. Dit zal dan ook niet vanuit het komende sectorplan worden versterkt. Dit geldt ook voor de informatica aan de Open Universiteit (OU) en de Tilburg University (TU), waar het informatica onderzoek plaatsvindt in de context van de sociale- en geesteswetenschappen. In het sectorplan SSH is ruimte voorzien voor digitalisering van de sociale- en geesteswetenschappen.

Tabel 4: Kengetallen en ambities in het informatica onderzoek en onderwijs.

	INFORMATICA			
	2016 (%V)	2017 (%V)	2018 (%V)	2024 (%V)
# INSTROOM BSC	2.372 (17)	2.797 (18)	3.321 (21)	3.913 (27)
# TOTAAL BSC	6.158 (15)	7.091 (17)	8.279 (19)	10.796 (27)
# INSTROOM MSC	1.667 (21)	1.846 (20)	2.194 (23)	2.955 (30)
# TOTAAL MSC	3.650 (18)	4.308 (19)	4.999 (20)	6.554 (27)
WP VAST (FTE)	318 (16)	334 (16)	379 (18)	541 (24)
WP TIJDELIJK (FTE)	682 (21)	697 (21)	704 (21)	1.052 (29)

#### 4.2.2 Omgevingsanalyse

De uitdagingen voor het onderwijs- en onderzoeklandschap van de informatica worden sterk beïnvloed door de digitaliseringsgolf die door de samenleving gaat. De ICT komt steeds dichterbij het individu. Dit brengt voor de informatica wetenschappelijke, technische, maatschappelijke en ethische uitdagingen met zich mee. Zo staat het doen van excellent onderzoek van voldoende omvang door de explosieve groei van de instroomcijfers onder druk. Daarnaast zet de steeds snellere adoptie van digitale producten en diensten door de samenleving de capaciteit voor nieuwsgierigheidsgedreven onderzoek verder onder druk en krijgt snelle kennisoverdracht voorrang. De informatica bouwt een steeds inniger relatie op met bijna alle andere disciplines en dit vergt aandacht voor het ontwikkelen van een homogene basis van fundamentele en generieke informaticakennis. Informatica heeft te maken met een braindrain, veroorzaakt door de overspannen arbeidsmarkt op informaticagebied, zowel nationaal als internationaal als binnen en buiten de universiteit; deze vormt een belemmering voor de noodzakelijke groei. Tot slot ligt er door de digitaliseringsgolf een belangrijke maatschappelijke uitdaging in de groeiende behoefte aan digitale geschooldheid. Dit vraagt om het onderwijs van digitale aspecten op alle onderwijsniveaus. Een positief neveneffect kan zijn dat een goede aanpak hiervan leidt tot een verhoogde interesse in informatica.

Kortom, de informatica staat als wetenschapsgebied op dit moment voor forse uitdagingen, niet in de laatste plaats omdat haar successen juist ook fundamentele vraagstukken blootleggen. Zo leiden schaalvergroting en decentralisatie tot nieuwe problemen rondom emergente complexiteit van digitale systemen en heeft de intrede van empirische methoden (zoals bij netwerken, *data science* en AI) geleid tot fundamentele vragen over de verklaarbaarheid van het gedrag van die systemen. Omdat bovendien digitale systemen vrijwel nooit meer in een gesloten context opereren, is duidelijk geworden hoe kwetsbaar zij kunnen zijn voor (on)bedoelde externe invloeden, met als gevolg een enorme groei van onderzoek op het gebied van veiligheid en privacy. Met de huidige sectorale gelden kan een deel van de meest nijpende tekorten worden aangevuld en aangewend voor de noodzakelijke versterking van de basis van de informatica, maar de voorziene snelle groei in de komende jaren zal volgende investeringen noodzakelijk maken.

#### 4.2.3 Focusgebieden voor de toekomst

Binnen het Nederlands wetenschappelijk informaticadomein is een aantal focusgebieden te onderscheiden, waarbij *data science* en artificiële intelligentie (AI) overlappen, vooral op het gebied van *machine learning*. In de tabel zijn de containerbegrippen *data science* en AI daarom vermeden en zijn 'smallere' begrippen gebruikt. Per focusgebied is aangegeven waar de huidige zwaartepunten van de universiteiten liggen.

- 1. Data modelleren en analyseren.** (Huidige zwaartepunten: LEI, RU, RUG, TUD, TU/e, UvA, UM, UT, UU) Met de komst van *big data* zijn vraagstukken rondom de modellering, organisatie, verwerking, opslag, analyse en visualisatie van data steeds prangender geworden. Alleen al de hoeveelheid en diversiteit van data in combinatie met de enorme verscheidenheid van bronnen (sensoren, sociale

media, multimediale databanken, open web, et cetera.) leiden tot fundamentele vragen over hoe en welke data geselecteerd moeten worden voor verwerking. Met betrekking tot sociaal-maatschappelijke vraagstukken is het onbekend welke technieken ons in staat stellen om tot waardevolle informatie te komen en tegelijk harde garanties te geven over behoud van privacy. Tot slot dwingen big-data-vraagstukken ons om de inrichting van traditionele data-verwerkende systemen te heroverwegen: nieuwe technieken zullen gezocht en ontwikkeld moeten worden. Welke dat zijn is nog veelal onbekend.

2. **Machinaal leren.** (Huidige zwaartepunten: LEI, RU, RUG, TUD, TU/e, UM, UvA, UU.) *Data science* en AI hebben de afgelopen jaren een explosieve groei doorgemaakt, mede door de ontwikkeling van geavanceerde *machine-learning*-technieken, waarin Nederland inmiddels een gedegen reputatie heeft opgebouwd. Het uitgangspunt is een systeem door het geven van veel voorbeelden zo te trainen dat het uiteindelijk zelf met nieuwe input tot goede output kan komen. Hierbij zijn talloze vragen naar boven gekomen die relevant zijn voor data science. Zo is een fundamenteel probleem dat het huidige machinaal leren geen inzichten geeft in waarom bepaalde output tot stand komt: het causaal verband tussen input en output is feitelijk onbekend. Ook is het niet duidelijk waar de grenzen van het machinaal leren liggen: wat kunnen we wel en wat kunnen we niet automatisch leren, en onder welke omstandigheden? Dit zijn niet alleen wetenschappelijk fundamentele vragen, maar ook essentiële vragen naarmate machinaal leren steeds meer ingezet wordt voor maatschappelijke vraagstukken: hoe komen we tot technieken die onze moraal meenemen over bijvoorbeeld discriminatie, censuur en opzettelijke manipulatie van informatie?
3. **Machinaal redeneren en interactie.** (Huidige zwaartepunten: LEI, RUG, TUD, UM, UT, UU, VU.) Nederland speelt al jaren in de AI *champions league* en behoort tot de aanjagers van het veld. Naast de snelle ontwikkelingen in de zelflerende AI is er grote behoefte aan AI-systemen die de samenwerking tussen mens en machine mogelijk maken, met als doel te komen tot inzichtelijke verklaringen en beslissingen, ook wel bekend onder de term 'AI with the human at the center'. Hoe slaan we een brug tussen de AI van regels die gemakkelijk te doorgronden zijn en de AI die leert uit data? Hoe communiceren mensen met intelligente machines terwijl hun interne representaties volstrekt verschillend zijn? Deze fundamentele vragen liggen al decennia voor, maar zijn door de snelle ontwikkelingen in de zelflerende AI nu urgenter dan ooit. De interactie tussen mens en intelligente machines is ook essentieel om te komen tot technieken die onze normen en waarden meenemen, bijvoorbeeld rondom discriminatie, censuur en opzettelijke manipulatie van informatie.
4. **Algoritmiek.** (Huidige zwaartepunten: LEI, RUG, TUD, TU/e, UU, VU.) Dit focusgebied is van oudsher prominent in de informatica en kan beschouwd worden als een van haar fundamenten. De Nederlandse algoritmiek behoort tot de wereldtop. Het fundamentele vraagstuk is hoe te komen tot formeel aantoonbaar efficiënte en correcte algoritmes en datastructuren, dat wil zeggen: bewijsbaar correcte algoritmes met een begrensde complexiteit, ondersteund door efficiënte datastructuren. Algoritmes met begrensde complexiteit worden steeds belangrijker in de context van heterogene, dynamische en *big data*. Bovendien zijn algoritmes met aantoonbaar correcte oplossingen een noodzaak voor verklaarbare output, wat essentieel is voor kritieke toepassingen. Dit leidt tot een scala van fundamentele vragen over formele specificaties, inherente tijd- en geheugencomplexiteit, optimaliteit, approximeerbaarheid en bewijsbaar begrensde foutmarges.
5. **Software.** (Huidige zwaartepunten: RU, RUG, TUD, TU/e, UT, UU, VU.) Informatica kan niet los worden gezien van programmeertalen en de concrete programma's (software) die de realisatie vormen van de algoritmen. Op het gebied van de softwareontwikkeling zijn vanaf het begin grote ontwikkelingen doorgemaakt. Voor de komende jaren zijn er grote uitdagingen in beeld voor de ontwikkeling van robuuste en betrouwbare software onder veranderende omgevingsinvloeden. Het is hierbij essentieel om voldoende flexibiliteit te hebben om software aan te passen aan nieuwe wensen en mogelijkheden. Daarnaast is er de grote uitdaging om de toenemende complexiteit van softwaresystemen beheersbaar te maken. Hier liggen grote methodologische vraagstukken over schaalbare softwareverificatie alsook het automatisch genereren van correcte software. Bij al deze onderwerpen spelen zowel empirisch als theoretisch onderzoek een grote rol.
6. **Security en privacy.** (Huidige zwaartepunten: RU, TUD, TU/e, UvA, UT, VU.) Nederland heeft een uitstekende wetenschappelijke reputatie opgebouwd op het gebied van *cyber security*. De

fundamentele onderzoeksvragen op dit gebied zijn geformuleerd in de nationale *cyber security research*-agenda (NCSRA III). Een van de grote informatica-uitdagingen waar de discipline voor staat is hoe de (on)veiligheid van een systeem aangetoond kan worden en hoe eventuele kwetsbaarheden automatisch te detecteren en repareren zijn. Daarbij komt dat de funderende principes van het ontwerpen en ontwikkelen van veilige systemen en software nog volstrekt onvoldoende bekend zijn. Maar hoe goed systemen ook ontwikkeld kunnen worden, geanalyseerd op kwetsbaarheden en gerepareerd, er blijft een dringende behoefte aan betere methodes om aanvallen te detecteren en systemen actief te verdedigen. Tot slot is er de uitdaging hoe privacy in de steeds verder gedigitaliseerde samenleving te garanderen is, terwijl de grenzen van technologische oplossingen nog onduidelijk zijn en wet- en regelgeving mogelijk noodzakelijk blijken om bescherming af te dwingen.

- 7. Genetwerkte computer- en *embedded* systemen.** (Huidige zwaartepunten: LEI, TUD, TU/e, UvA, UT, VU.) De informatici zijn op het gebied van computersystemen, computernetwerken en *embedded* systemen wetenschappelijk excellent, zo blijkt telkens weer. Toekomstige genetwerkte computersystemen zullen volledig gedistribueerd en autonoom zijn. Het fundamentele probleem hierbij is dat fysieke schaalbaarheid en globaal consistent gedrag zich theoretisch aantoonbaar niet laten combineren. Het is een fundamentele open vraag hoever de combinatie praktisch mogelijk is en onder welke aanvaardbare condities. De problematiek rondom schaalbare implementeerbaarheid van *blockchains* is hier een bekend voorbeeld van. *Embedded* systemen, inclusief sensornetwerken, vormen een daadwerkelijke materialisatie van digitale oplossingen, en vallen uiteen in twee klassen. Extreem hoge kwaliteitseisen worden gesteld aan Cyber Physical Systems terwijl het 'Internet of Things' refereert aan het grootschalig vergaren van data over artefacten (objecten, processen) in de fysieke wereld. Wetenschappelijke uitdagingen liggen niet alleen in de miniaturisatie van de hardware maar ook in de energieconsumptie en duurzaamheid. Een integrale aanpak en optimalisatie van hardware en software is nodig. De beoogde hoeveelheid *embedded* systemen in de toekomst vraagt om (software)oplossingen die efficiënt met complexiteit, heterogeniteit en dynamiek van deze systemen om kunnen gaan en deze beheersbaar maken.

## 4.3 Natuurkunde

### 4.3.1 Universitaire landschap

Natuurkunde onderzoekt de elementaire bouwstenen, interacties en eigenschappen van materie. De Nederlandse natuurkunde staat internationaal hoog aangeschreven en heeft al tien Nobelprijzen opgeleverd. Hoewel van oorsprong vooral bedreven vanuit nieuwsgierigheid zijn er in de afgelopen decennia ook sterke samenwerkingsverbanden met de industrie opgebouwd en is er gericht gewerkt aan maatschappelijke uitdagingen zoals gezondheid en de energietransitie.

Het overgrote deel van het Nederlands natuurkundeonderzoek vindt plaats aan de universiteiten LEI, RU, RUG, TUD, TU/e, UvA, UM, UT, UU, VU en WUR en de NWO-onderzoeksinstituten AMOLF, ARCNL, DIFFER en Nikhef. Het natuurkundeonderzoek was van oorsprong sterk georganiseerd in de Stichting FOM. Deze taak ligt nu in handen van NWO, waar recent de Tafel Natuurkunde is opgericht en nieuwe werkgemeenschapscommissies zijn ingesteld. Ook is er goede nationale afstemming in het bètadecanenoverleg en het Platform Academische Natuurkunde (PAN). Gegeven het opgaan van FOM in NWO zal een sterkere regierol dan voorheen van het PAN gevraagd worden. Een nauwe verbondenheid met de nieuwe Tafel Natuurkunde lijkt hierbij wenselijk, om zo tot een goed afgestemd beleid voor de eerste en tweede geldstroom te komen. Er zijn al succesvolle eerste afspraken in deze richting gemaakt, waarvan de uitwerking over de looptijd van dit sectorplan zal plaatsvinden. De natuurkunde is ook sterk internationaal verbonden door grootschalige infrastructuur en samenwerkingsverbanden met een langjarige horizon, zoals ESRF, EMFL, CERN, ITER, of het *graphene flagship*. Deze krachtige zelforganisatie zorgde er in het verleden voor dat scherpe keuzes gemaakt konden worden, zoals de tijdige inzet op nanotechnologie en biofysica, maatschappelijk relevante thema's en publiek-private samenwerkingen. Voorbeelden zijn onder meer het samenbrengen van HFML en FELIX tot een wereldwijd unieke infrastructuur, de omvorming van FOM-Rijnhuizen tot het energie-instituut DIFFER en de

samenwerkingsverbanden met onder andere Philips, Shell, Unilever, BP en Océ en de oprichting van het publiek-private instituut ARCNL met ASML.

In onderstaande tabel zijn de kengetallen en ambities van het natuurkundeonderwijs en -onderzoek weergegeven, op basis van opgave van de participerende universiteiten.

Tabel 5: Kengetallen en ambities in het natuurkunde onderzoek en onderwijs.

	NATUURKUNDE			
	2016 (%V)	2017 (%V)	2018 (%V)	2024 (%V)
# INSTROOM BSC	1.508 (24)	1.498 (24)	1.520 (25)	1.947 (32)
# TOTAAL BSC	4.176 (21)	4.368 (22)	4.651 (24)	5.908 (30)
# INSTROOM MSC	748 (24)	819 (24)	852 (26)	1.331 (31)
# TOTAAL MSC	1.896 (22)	2.121 (23)	2.274 (23)	3.224 (31)
WP VAST (FTE)	440 (15)	447 (15)	459 (15)	527 (23)
WP TIJDELIJK (FTE)	1.585 (25)	1.593 (24)	1.602 (24)	1.834 (30)

#### 4.3.2 Omgevingsanalyse

De zelforganiserende aanpak heeft ertoe geleid dat de Nederlandse natuurkunde over de volle breedte kwalitatief zeer sterk is en een citatie-impact heeft van 43% boven het wereldgemiddelde. Stimulerende voorbeelden zijn QuTech als nationaal icoon, de oprichting van een Max Planck Center for Complex Fluid Dynamics en diverse Zwaartekrachtprogramma's, ERC-subsidies en Spinoza-prijzen. Sinds het vorige sectorplan zijn er enorme ontwikkelingen gaande in de natuurkunde en de maatschappij, waardoor er een steeds meer nadruk is komen te liggen op interdisciplinair en maatschappelijk gedreven onderzoek en onderzoek in grote (inter)nationale samenwerkingsverbanden. Te denken valt aan de digitaliseringsgolf en de daarmee gepaard gaande explosie in energieconsumptie door en privacy-security aspecten van ICT of de detectie van zwaartekrachtgolven. Deze ontwikkelingen vragen om een andere manier van opleiden en onderzoek doen. Door de sterk toegenomen studentenaantallen is er echter weinig ruimte om hierin te innoveren, tegelijkertijd excellent onderzoek te doen en hoge kwaliteit onderwijs te leveren.

De beschikbare menskracht en (kennis)capaciteit die met dit sectorplan beschikbaar komt biedt de kans om deze uitdagingen het hoofd te bieden, daarbij de hoge kwaliteit van onderzoek te behouden, het volume hiervan naar een internationaal meer gangbare omvang te brengen en de aantrekkelijkheid voor (beginnende) topwetenschappers te vergroten. Door een betere spreiding van de onderwijslast zal de kwaliteit daarvan gewaarborgd kunnen blijven, terwijl er ook meer ruimte ontstaat om in te zetten op maatschappelijk of economisch belangrijke thema's in zowel onderzoek als onderwijs.

#### 4.3.3 Focusgebieden voor de toekomst

Om de noodzakelijke vernieuwing in het met dit sectorplan beoogde onderzoekpalet te beschrijven zijn de grote uitdagingen voor de natuurkunde ingedeeld in zes focusgebieden. Hierbij is ook het werk van de Commissie Dijkgraaf (Visiedocument 2025) in acht genomen. De focusgebieden zijn goed te verbinden met de NWO-werkgemeenschapscommissies. Hieronder volgt een omgevingsanalyse en toekomstvisie per focusgebied, inclusief een aanzet tot een hernieuwde nationale taakverdeling.

**1. Particle & gravitational physics.** In het experimentele deeltjes- en zwaartekracht onderzoek vullen 'table-top experiments', en grote internationale samenwerkingen bij deeltjesversnellers (LHC@CERN), astro(deeltjes)fysica-observatoria en zwaartekrachtsgolfdetectoren (LIGO/Virgo) elkaar aan. Nikhef coördineert dit onderzoek met het samenwerkingsverband met RU, RUG, UvA, UU en VU, en binnenkort ook UM. Aansluitend zijn sterke theoriegroepen georganiseerd in onder andere het D-ITP en LOTN.

Recent zijn meerdere opzienbarende ontdekkingen in dit gebied gedaan (Higgs boson, zwaartekrachtsgolven) waarbij het Nederlandse onderzoek een belangrijke rol speelde. Voor de toekomst wordt ingezet op het deeltjes- en zwaartekracht onderzoek: van hoge-energie- en astrodeeltjesfysica, zwaartekrachtsgolven en kosmologie, tot quantumgravitatie en snaartheorie-onderzoek. De mogelijke komst van de Einstein Telescoop naar Nederland kan zorgen voor een bijkomende sterke impuls. Complementair hieraan kunnen nieuwe eigenschappen van deeltjes of donkere materie ontdekt worden bij versnellers, precisie-experimenten en observatoria, die uiteindelijk leiden tot nieuwe doorbraken in ons denken over de ultieme bouwstenen van de materie, de structuur van het heelal en het weefsel van ruimte en tijd. CERN blijft een belangrijke partner. Het onderzoek is sterk verbonden met de NWA-route 'bouwstenen van materie en fundamente van ruimte en tijd', focusgebieden 2 en 6, en de roadmap 'Advanced Instrumentation' van de topsector HTSM.

- 2. Quantum materials & technologies.** Het Nederlandse onderzoek aan quantummaterie, nanostructuren en quantumtechnologie heeft wereldwijd een uitstekende reputatie. De universiteiten LEI, RU, RUG, TUD, TU/e, UvA, UT en UU hebben elk sterke groepen op dit gebied wat tot uiting komt in de bijdragen aan het EU Quantum Flagship en de Nationale Icoon status van QuTech. Quantummaterie en nanostructuren ontleen hun unieke eigenschappen aan quantum veel-deeltjes-interacties resulterend in een scala aan emergente fenomenen. De recente ontdekking van Dirac materialen en topologie als regulerend principe leidt tot nieuwe quantumfasen en quasideeltjes. Geheel nieuwe materialen komen binnen bereik door ze atoomlaag voor atoomlaag op te bouwen. Het maakt zowel quantummaterie bij steeds hogere temperaturen mogelijk, als geheel nieuwe materiaalsystemen met nieuwe elektronische, magnetische en fotonische eigenschappen (fotonica en spintronica voor ICT). Het lukt steeds beter zuiver quantummechanisch gedrag in systemen te isoleren; deze nieuwe quantumsystemen vormen de basis van revolutionaire quantumtechnologie, die een totale vernieuwing teweeg zal brengen in onze computers en communicatieapparatuur. Ook zullen hiermee precisieingen en testen van de fundamente van de quantumtheorie mogelijk gemaakt worden. Dit onderzoek bevindt zich in het hart van de Quantum-Nano en de Materialen NWA-routes en is goed verbonden met de industrie (onder andere Intel, Microsoft). Ook is met QuSoft en het Quantum Software Consortium (Zwaartekracht) een inspirerende link gelegd tussen de fysica, informatica en wiskunde.
- 3. Complex systems, soft matter & fluids.** Op dit gebied vindt internationaal toonaangevend onderzoek plaats aan LEI, TUD, TU/e, UvA, UU, UT, WUR en AMOLF. Het onderzoek is landelijk uitstekend afgestemd via softmatter.nl en de Burgers onderzoeksschool. Samen met MCEC (Zwaartekracht), zorgt dit voor een sterke verbinding met chemie en technische wetenschappen, ook zijn er sterke connecties met de biologie en aard- en milieuwetenschappen. Het onderzoeksgebied heeft impact op zachte/actieve/biogeïnspireerde materie, complexe vloeistoffen en stromingen, plasma's, metamaterialen en emergent gedrag. Nederland speelt hierin een vooraanstaande rol en kan bijdragen aan de nieuwe thema's die snel aan belang groeien. Dit zijn onder meer het ontwerpen van nieuwe functionele (meta)materialen, actieve en robotische materialen, hydrodynamica van continuüm tot moleculaire schalen en turbulentie van meerfasensystemen. Deze fundamentele thema's worden mede gestimuleerd door vragen vanuit de NWA (bijvoorbeeld Bouwstenen, Water, Materialen en Energie) en industrie. Naar verwachting zullen de zich snel ontwikkelende gebieden van 3D-printing, zelfassemblage en *machine learning/data mining* een belangrijke rol gaan spelen in dit focusgebied. De samenwerking met hightech- en voedingsmiddelenindustrie (DSM, Friesland Campina, Unilever) is goed ontwikkeld.
- 4. Physics of life & health.** Dit onderzoek richt zich enerzijds op 'Natuurkunde van Leven': het begrijpen van levensprocessen op moleculaire, cellulaire, weefsel- en zelfs organismeschaal vanuit de natuurkunde, verbonden met onder meer het NWA-thema 'Oorsprong van het leven'. LEI, TUD, RU, RUG, UM, UT, UU, VU, WUR en AMOLF leveren wereldwijd erkende bijdragen aan dit gebied. Daarnaast richten vooral TUD, TU/e, UM, UT en VU zich ook op 'Natuurkunde voor Gezondheid': het toepassen van fysische principes voor diagnostiek en interventie, wat aansluit bij het NWA-thema 'personalized medicine'. De grote uitdagingen liggen voor 'Natuurkunde van Leven' in het begrijpen van leven op niveaus van hogere complexiteit: van biomoleculen naar cellulaire, weefsel- en organismeschaal, het maken van een kunstmatige cel (Zwaartekrachtprogramma) en de inzet van fotosynthese voor voedsel



en energieproductie. Voor de 'Natuurkunde voor Gezondheid' liggen de uitdagingen in de ontwikkeling van nieuwe *imaging*, diagnostische en therapeutische technieken die zowel betaalbaar als specifiek zijn. Belangrijk hiervoor is onder andere de Nationale Agenda Fotonica, waarin medische fotonica een belangrijke toepassing is. Onderzoek op beide gebieden heeft sterke banden met de scheikunde ('chemie van het leven'), biologie en (academische) medische centra, de topsectoren LSH en HTSM en industriële partijen als Philips, PANalytical en FEI.

- 5. Energy & sustainability.** Dit onderzoek betreft conversieprocessen (zonnecellen, kernfusie), opslag (*solar fuels*, batterijen), energiebesparing binnen informatietechnologie (fotonica, neuromorfische processoren, spintronica) en klimaat (relatie atmosfeer met bio-, oceaan- en bodemsystemen). De onderzoeksafstemming is op diverse gebieden landelijk georganiseerd (NanoLabNL, Zwaartekracht 'Geïntegreerde Nanofotonica', Nationale Agenda Fotonica, NERA) of juist internationaal (fusieonderzoek, ITER). RU, RUG, TUD, TU/e, UT, UU, VU, AMOLF en DIFFER zetten hier sterk op in. De energietransitie vraagt niet één maar een breed scala aan nieuwe technologieën, waaronder ook verdere optimalisatie van zon- en windenergie en waterstoftechnologie. Dit vraagt om onderzoek aan nieuwe materialen en alternatieve energiebronnen, de inzet van nieuwe architecturen en technologieën voor de digitale samenleving 'voorbij Moore en von Neumann', zoals geïntegreerde nanofotonica, en het maken van geavanceerde observaties en klimaatmodellen om impact van ons energiegebruik op de atmosfeersamenstelling te analyseren. Ontwikkelingen in *machine learning* zullen grote gevolgen hebben voor integrale simulatie van fusiereactorprocessen en klimaatmodellen. Verder zal vooruitgang in het met atomaire precisie ontwerpen en maken van materialen tot doorbraken leiden in energieconversie, -opslag en -besparing. Nederland is uitstekend gepositioneerd om op al deze gebieden een bijdrage te leveren. Er is goede aansluiting bij een aantal NWA-routes en de samenhangende grote uitdagingen. De samenwerking met de chemie, hightech, en ICT-sectoren is goed ontwikkeld.
- 6. Precision measurement & fabrication.** Het verleggen van de ultieme grenzen van wat meet- en maakbaar is vormt een drijvende kracht voor nieuwe natuurkunde en daagt haar ook uit: doorbraken in de fysica zijn regelmatig het gevolg van het realiseren van nieuwe instrumentatie. Dankzij investeringen en hechte samenwerking in nanotechnologie in de afgelopen tien jaar (o.a. NanoNed, NanoNext) en infrastructuur (NanolabNL, HFML-FELIX) heeft Nederland hierin een internationaal sterke reputatie opgebouwd. Het fabriceren met nanometerprecisie en het onderzoek aan nieuwe fysische verschijnselen tot op de schaal van individuele moleculen of atomen vereist nieuwe kennis die het mogelijk maakt eigenschappen van materialen op een fundamentele manier te veranderen. Dit leidt tot disruptieve nieuwe technologie (spintronica, fotonisch-elektronische hybriden, etc cetera.) die een antwoord vormt op het einde van de Wet van Moore. Toekomstige ontwikkelingen liggen vooral op het gebied van de multidimensionale spectroscopie, de EUV lithografie, *lense-less* en *single shot X-ray imaging*, *table-top* combinaties van atomaire en extreme tijdsresolutie en het toepasbaar maken van deze geavanceerde technieken in complexe omstandigheden, bijvoorbeeld in vivo. Hiervoor is de ontwikkeling en onderhoud van geavanceerde instrumentatie en infrastructuur cruciaal. Onderdelen van dit onderzoek worden sterk gedreven vanuit RU, TUD, TU/e, UM, UT, VU en ARCNL. Er bestaat een sterke verbinding met de hightechsector.

## 4.4 Scheikunde

### 4.4.1 Universitaire landschap

Chemie is de discipline die onderzoekt, ontwerpt, creëert en verbindt. De Nederlandse chemie kent een lange traditie van hoogstaand onderzoek en is onmisbaar voor de (maak)industrie alsook voor het oplossen van de grote maatschappelijke vraagstukken: duurzaamheid, energie, gezondheidszorg en grondstofschaarste. Het blijvend versterken van het fundament van de Nederlandse chemie is essentieel voor de vorming van een duurzame en toekomstbestendige samenleving en garandeert dat jonge mensen ook in de toekomst goed opgeleid worden (zie ook het Visiedocument 2025 van de Commissie Dijkgraaf).

Chemisch onderzoek in Nederland vindt hoofdzakelijk plaats aan de universiteiten LEI, RU, RUG, TUD, TU/e, UvA, UM, UT, UU, VU en WUR. Het onderzoek is van het allerhoogste niveau met als absoluut hoogtepunt de Nobelprijs voor Ben Feringa in 2016. Naast de universitaire scheikunde vindt er ook moleculair onderzoek plaats aan de UMC's, NKI, het Hubrecht Instituut, een aantal hbo's en TO2's, en de NWO-instituten AMOLF, DIFFER en ARCNL. Ook in het bedrijfsleven wordt veel chemisch onderzoek gedaan. Nederland kent een grote traditie van publiek-private samenwerkingen en het bedrijfsleven waardeert hierbij nadrukkelijk de chemische kennis en infrastructuur van de universiteiten. Deze publiek-private samenwerkingen worden in de EU als voorbeeld beschouwd en krijgen internationaal navolging.

In de nationale coördinatie van het academisch chemisch onderzoek hebben de Tafel Chemie en de nieuw gevormde chemie werkgemeenschapscommissies binnen het ENW-domein van NWO de rol overgenomen van NWO Chemische Wetenschappen. Gegeven de trend om de natuurwetenschappen bètabreed te organiseren binnen zowel de universiteiten als NWO, is het wenselijk om daarnaast een nationaal platform voor de scheikunde in te stellen. Een dergelijk platform kan in navolging van het succes van bijvoorbeeld het IPN en PWN dienen als nationaal disciplinair overlegorgaan, om *best practices* uit te wisselen tussen universiteiten onderling en gezamenlijk de strategie voor de discipline vorm te geven. Zo kan *bottom-up* voeding gegeven worden aan zowel het bètadecanenoverleg als (via de Tafel Chemie) NWO. Eerste besprekingen om een dergelijk overleg op te starten hebben reeds met de Tafel Chemie plaatsgevonden en ook een actieve rol van de KNCV hierin lijkt logisch. Verdere uitwerking zal plaatsvinden over de looptijd van het komend sectorplan. Hiernaast heeft ook de Topsector Chemie heeft een centrale regierol die met name gericht is op de publiek-private samenwerkingen. Verder vindt zelforganisatie onder andere plaats via verschillende Zwaartekrachtconsortia waarin chemisch onderzoek centraal staat, de chemische vakvereniging (KNCV), alsook het virtuele onderzoeksinstituut ARC CBBC. CHAINS, de jaarlijkse chemieconferentie, draagt bij aan de organisatie en zichtbaarheid van het veld en zorgt daarnaast voor kruisbestuiving tussen de verschillende subdisciplines binnen de chemie. Verder heeft ook het bètadecanenoverleg in de afgelopen jaren een belangrijke rol gespeeld in landelijke afstemming en regie in de scheikunde.

De grote maatschappelijke vraagstukken zijn vrijwel altijd multidisciplinair van aard. Vanuit de eigen sterkte zal de chemie nog meer met andere disciplines samenwerken, zowel nationaal als internationaal. Naast bestaande relaties met de natuurkunde en levenswetenschappen gebeurt dat in toenemende mate met de computationele wetenschappen. Een multidisciplinaire aanpak is op termijn alleen succesvol wanneer de onderliggende disciplines voldoende krachtig zijn.

In onderstaande tabel zijn de kengetallen en ambities van het scheikundeonderwijs en -onderzoek weergegeven, op basis van opgave van de deelnemende universiteiten.

Tabel 6: Kengetallen en ambities in het scheikunde onderzoek en onderwijs.

	SCHEIKUNDE			
	2016 (%V)	2017 (%V)	2018 (%V)	2024 (%V)
# INSTROOM BSC	1.757 (40)	1.757 (43)	1.824 (42)	2.278 (45)
# TOTAAL BSC	4.956 (38)	5.274 (40)	5.446 (41)	6.864 (45)
# INSTROOM MSC	1.080 (42)	1.117 (42)	1.189 (44)	1.655 (45)
# TOTAAL MSC	2.836 (41)	3.068 (40)	3.310 (40)	4.023 (45)
WP VAST (FTE)	420 (16)	425 (16)	440 (18)	519 (24)
WP TIJDELIJK (FTE)	1.699 (35)	1.794 (37)	1.827 (37)	2.147 (38)

#### 4.4.2 Omgevingsanalyse

De sectorale aanpak voor de chemie heeft zijn kracht bewezen in het Sectorplan Natuur- en Scheikunde (SNS). De Commissie Breimer constateert in haar eindrapportage dat zowel op het gebied van onderwijs als onderzoek belangrijke stappen zijn gezet, maar ook dat additionele investeringen nodig zijn om de Nederlandse chemie haar internationaal vooraanstaande positie te doen behouden en versterken. Nog steeds scoort de Nederlandse chemie, internationaal gezien, buitengewoon goed in wetenschapbrede competities zoals de ERC. Ook is de chemie bovengemiddeld vertegenwoordigd in maar liefst zeven Zwaartekracht-consortia. Deze prominente positie is mede het gevolg van relatief grote investeringen en vrije wetenschappelijke ruimte in het verleden. Echter, de laatste jaren laten een kentering zien die rechtstreeks terug te voeren is op teruglopende onderzoeksinvesteringen die inmiddels zijn gedaald tot minder dan zestig procent van het gemiddelde van de referentielanden (zie figuur 3 in hoofdstuk 3). De aanbevelingen van de Commissie Breimer voor verdere versterking van de natuur- en scheikunde geven aan hoe nieuwe investeringen in te zetten om de dalende trend in de omvang en de internationale impact van het onderzoek te keren en de aantrekkelijkheid van ons land voor (top)onderzoekers te vergroten.

Er dienen zich ook nieuwe uitdagingen aan, bijvoorbeeld op het vlak van de lerarenopleiding, diversiteit onder studenten en staf, en de extreme toename van aantallen studenten. Veel doorbraken in de chemie worden mede mogelijk gemaakt door technologische ontwikkelingen (EM, flow-chemie, MS, NMR, optische microscopie, rekencapaciteit), die vragen om grootschalige investeringen maar tevens om middelen om dure faciliteiten operationeel te houden. Ook het opleiden van de 'chemicus van de toekomst', met een adequaat palet aan competenties, moet aandacht krijgen. Hierbij gaat het om de link met opkomende disciplines zoals de computationele wetenschappen en op het beter voorbereiden van studenten op het gezamenlijk werken aan grote uitdagingen en ondernemerschap. Na hun opleiding vervolgen veel chemici hun weg immers buiten de academische wereld, bijvoorbeeld in de vele succesvolle chemische startup bedrijven die Nederland rijk is.

#### 4.4.3 Focusgebieden voor de toekomst

Deze paragraaf beschrijft de focusgebieden met de grote uitdagingen waarvoor de chemie staat en hoe onderzoekszwaartepunten in het toekomstig landschap hieraan bijdragen. Onderzoeksgebieden die meer dan één focusgebied bestrijken zijn ondergebracht onder 'Fundamenten van de chemie en chemische methodes'. Er heeft nationale afstemming plaatsgevonden over de zwaartepunten en de nationale onderzoeksprofielen. Nadere uitwerking en precisering komt tot uiting in de profileringsplannen van de universiteiten.

- 1. Chemische Technologie en Conversie.** Zwaartepunten in dit focusgebied bevinden zich aan de LEI, RUG, TUD, TU/e, UvA, UM, UT en UU. Hernieuwbare energiebronnen en grondstoffen zijn nodig om de maatschappij te verduurzamen. De chemie loopt voorop in de energietransitie en zal zelf duurzaam worden. Hernieuwbare bouwstenen voor de chemische industrie komen uit de natuur, door (bio)gekatalyseerde conversie van afval en biomassa, maar ook door benutting van bijvoorbeeld stikstof-, fosfaat- en kooldioxide-houdende zijstromen. Fundamenteel inzicht in chemische reacties is noodzakelijk: wat gebeurt er in een (katalytisch) proces, welke chemische en fysische processen spelen zich af op grensvlakken waar vaste stoffen, vloeistoffen, gassen, fotonen en elektronen samenkomen? Nieuwe, efficiënte katalysatoren en chemische transformaties (foto- en elektrochemische conversies) moeten ontworpen worden. Integratie van (bio)katalyse, spectroscopie, en berekeningen met synthese is noodzakelijk om geavanceerdere stoffen te bereiden. Alle energiedragers, bouwstenen en designer moleculen zullen in de toekomst moeten worden geproduceerd in slimme, geïntegreerde productieprocessen (onder andere 'flow', in plaats van 'batch', en licht- of stroomgedreven, in plaats van warmtegedreven). De radicaal andere energiebronnen en grondstoffen met inherente fluctuaties maken dat radicaal nieuwe processen moeten worden ontworpen. Afvalstromen zullen moeten worden beperkt, schaarse grondstoffen teruggewonnen en productieprocessen verbonden en afgestemd op vraag en aanbod van energie en grondstoffen.
- 2. Chemie van materialen.** Zwaartepunten in dit focusgebied bevinden zich aan de RUG, TUD, TU/e, UM, UT, UU, en WUR. Nieuwe materialen staan aan de basis van oplossingen voor maatschappelijke uitdagingen: transitie naar een duurzame samenleving, slimme materialen in elektronica, vervoer en

mobiliteit, gezondheidszorg, sensoren in de voedselindustrie en de introductie van quantumtechnologie. Dankzij toenemend begrip lonkt de mogelijkheid de eigenschappen van materialen te voorspellen en materialen te ontwerpen met gewenste functionaliteiten en een langere levensduur. Nieuwe structuren op basis van moleculaire en colloïdale bouwstenen kunnen met ongeëvenaarde precisie en efficiëntie worden ontworpen vanaf de nanoschaal tot de macroschaal. De ontwikkeling van materialen en oppervlakken met een combinatie van functionaliteiten, in toenemende mate opgebouwd uit meerdere basismaterialen (composieten, hybride systemen), zullen met innovatieve productietechnologieën, zoals 3D- printen en betere karakterisering tot op atomaire resolutie, binnen handbereik komen. Inzicht in de moleculaire eigenschappen is essentieel en controle over materiaaleigenschappen is noodzakelijk voor innovaties voor onder andere efficiënte energieproductie en opslag, reductie in gebruik van (schaarse) grondstoffen en energie, oplossingen voor hergebruik, miniaturisering, toepassing van multifunctionele coatings en voor toepassing in de gezondheidszorg.

- 3. Chemie van leven.** Zwaartepunten in dit focusgebied bevinden zich aan LEI, RU, RUG, TU/e, UM, UT, UU, VU en WUR. Chemie van leven is belangrijk voor de transitie naar een groenere chemie en de ontwikkeling van op maat gemaakte medicijnen om de groeiende gezondheidsproblemen in onze verouderende maatschappij het hoofd te bieden. Het verschaft inzicht in de moleculaire mechanismen in de cel, van molecuul tot complexe reactienetwerken. Ontwikkelingen in de structuurbiologie (time-resolved X-ray, XFEL, microscopie) zullen een grote rol gaan spelen in het ophelderen van dynamische structuren. Ontwikkelingen in EM, NMR, massaspectrometrie en lichtmicroscopie, in combinatie met chemische sondes en in vivo ligaties, maken de bestudering van interacties tussen complexe, dynamische structuren in levende cellen mogelijk. De volgende stap in niveau van complexiteit is het ophelderen van de essentiële processen in de context van de complexe fysische chemie van de cel, om zo te komen tot systeeminzicht. Parallel hieraan zullen bottom-up complexe biomoleculaire netwerken moeten worden ontworpen en de ontluikende eigenschappen ervan doorgrond. Eén van de grote uitdagingen is het bouwen van een cel vanuit moleculaire componenten, bijvoorbeeld voor het de novo ontwerpen van cellulaire fabriekjes. Computatieve chemie, inclusief machine- en *deep learning* (AI), zal in toenemende mate de ontginning van de moleculaire complexiteit (omics) van de cel en de (re)constructie van metabole netwerken sturen. Het virtueel screenen van eiwit- en ligand bibliotheken met behulp van computatieve technieken zal resulteren in nieuwe toepassingen op het gebied van de levensmiddelenchemie, de industriële biotechnologie en de chemische biologie.
- 4. Complexe moleculaire systemen.** Zwaartepunten in dit focusgebied bevinden zich aan de RU, RUG, TU/e en UT. Kenmerkend voor complexe systemen is de interactie tussen grote aantallen individuele 'spelers' en het ontstaan van gedrag dat niet direct herkenbaar is in de eigenschappen van de losse delen. Op moleculair terrein zijn er enorme uitdagingen om complexe systemen te ontwerpen, bouwen en bestuderen. Een belangrijk doel is het begrijpen van ontluikend gedrag vanuit de interacties tussen moleculen en de interacties binnen complexe moleculen. Interacties vinden plaats op diverse lengte- en tijdschalen, en de inspiratie komt onder andere uit levende systemen. De grote uitdaging is het ontwerpen van netwerken van chemische reacties die leiden tot zichzelf in stand houdende energie-dissiperende systemen, die uiteindelijk niet onderdoen voor de complexiteit van levende systemen. Belangrijke vragen betreffen de controle van de stroom van bouwstenen en chemische energie door uit-evenwichtsystemen. Bij het ophelderen ervan zullen ook nieuwe ontwikkelingen op het gebied van AI een belangrijke rol spelen. Naast een beter begrip van leven kunnen complexe moleculaire systemen ingezet worden voor compleet nieuwe materialen. De chemie is in staat een grote variëteit aan microscopische bouwstenen te maken waarvan de vorm en compositie eindeloos gevarieerd kunnen worden. Door deze bouwstenen met elkaar samen te laten werken kunnen dynamische materialen ontstaan die zich aanpassen aan hun omgeving, informatie opslaan en verwerken, en, uiteindelijk, zelf evolueren naar steeds complexere functies.
- 5. Fundamenten van de chemie en chemische methodes.** Zwaartepunten in dit focusgebied bevinden zich aan de LEI, RUG, RU, TU/e, UU, UM, UvA/VU en WUR. Een belangrijk fundament van de chemie is de expertise in het ontwerp en de synthese van (complexe) moleculen, dat wil zeggen de ontwikkeling van nieuwe chemische reacties en moleculen, de bestudering van reactiviteit en de integratie van synthesesmethoden. Hiermee is dit focusgebied vervlochten met de andere vier en

beoogt het de kracht van nieuwe gebieden binnen de chemie en op het snijvlak van chemie met natuurkunde, biologie en computerwetenschappen, te waarborgen. Ontwikkelingen in computationele en experimentele technieken (microscopie, spectroscopie, analytische chemie) stellen onderzoekers in staat chemische reacties in meer detail te doorgronden en op nog kleinere lengte- en tijd-schaal te bestuderen. Tegelijkertijd komen er op deze manier meer mogelijkheden om grote complexe moleculaire systemen te bouwen en de emergente eigenschappen ervan te begrijpen.

## 4.5 Wiskunde

### 4.5.1 Universitaire landschap

Wiskunde is de fundamentele taal van de natuur- en computationele wetenschappen. Wiskunde legt patronen en structuren bloot. Zij creëert daarmee universele inzichten en oplossingen die los van elke context geldig zijn. Nieuwe wiskundige ideeën vormen een onmisbaar element voor de razendsnelle ontwikkelingen in de wetenschap, technologie en maatschappij.

De Nederlandse wiskunde heeft een lange traditie van nationale samenwerking. Het gemeenschappelijke masteronderwijs in MasterMath is daarvan een aansprekend voorbeeld. Sinds 2006 is een omvangrijk deel van het masteronderwijs georganiseerd op landelijk niveau. Dit heeft geleid tot een cursusaanbod van hoogstaande kwaliteit en van ongekennde reikwijdte. De wiskundeopleidingen scoren in de volle breedte zeer goed, zowel bij onderwijsvisitaties als in de jaarlijkse Nationale Studenten Enquête.

Het Nederlandse wiskundeonderzoek is (vanaf circa 2005) geprofileerd in de vier nationale onderzoekclusters DIAMANT, GQT, NDNS+ en STAR. De wiskundeclusters spelen in op actuele ontwikkelingen, onder andere door het organiseren van workshops en zomerscholen, en zorgen voor internationale zichtbaarheid. Door deze nationale profilering behoort de Nederlandse wiskunde tot de internationale top op de gebieden die bestreken worden door de vier clusters. In 2011 beoordeelde een internationale evaluatiecommissie de kwaliteit van het onderzoek in de vier clusters over de volle breedte als 'excellent'. De negen universitaire wiskunde-instituten en (de wiskundigen van) het Centrum voor Wiskunde en Informatica (CWI) participeren afwisselend (naar gelang de aanwezige expertise) in de vier nationale clusters. De onderzoekvisitaties van 2010 en 2016 laten zien dat de negen instituten zich continu aan het front van de internationale wiskunde bevinden en dat de maatschappelijke relevantie van het onderzoek bovendien excellent is (zie de Qanu rapporten).

Op bestuurlijk niveau vindt vanaf 2010 regie plaats via het Platform Wiskunde Nederland (PWN). Daarbinnen richt de PWN Commissie Onderzoek zich op het onderzoekklimaat voor de wiskunde en stimuleert bijvoorbeeld de wiskundebijdrage aan de Nationale Wetenschapsagenda. De PWN Commissie Onderwijs houdt zich bezig met het wiskundeonderwijs in het primair en secundair onderwijs en treedt sinds kort op als permanente curriculumcommissie. In 2015 werd het Deltaplan voor de Nederlandse Wiskunde uitgebracht door PWN en NWO. Sindsdien werken PWN en de nieuw ingestelde Wiskunderaad samen aan de implementatie en uitwerking van de acties in dat Deltaplan.

In onderstaande tabel zijn de kengetallen en ambities betreffende het wiskunde onderwijs en onderzoek weergegeven, op basis van de opgave vanuit de participerende universiteiten.

Tabel 7: Kengetallen en ambities in het wiskunde onderzoek en onderwijs.

	WISKUNDE			
	2016 (%V)	2017 (%V)	2018 (%V)	2024 (%V)
# INSTROOM BSC	1.057 (30)	1.066 (31)	1.038 (33)	1.384 (37)
# TOTAAL BSC	2.544 (32)	2.802 (31)	2.873 (32)	3.902 (35)
# INSTROOM MSC	407 (32)	421 (31)	438 (28)	712 (36)
# TOTAAL MSC	1079 (31)	1.137 (31)	1.206 (29)	1.753 (35)
WP VAST (FTE)	248 (12)	250 (13)	261 (13)	314 (22)
WP TIJDELIJK (FTE)	364 (20)	344 (23)	349 (22)	471 (28)

#### 4.5.2 Omgevingsanalyse

De intrinsieke waarde van de wiskunde als tak van de wetenschap is evident. Daarnaast is wiskunde een universeel, onmisbaar element in de ontwikkelingen in alle natuurwetenschappen en overige kwantitatieve disciplines. De rol van wiskunde in de samenleving en het bedrijfsleven neemt alleen maar toe. Het US Bureau of Labor Statistics voorspelt dat van de top twintig snelst groeiende beroepsgroepen in het komende decennium er drie op het vakgebied van de wiskunde liggen (statisticus 34% groei, wiskundige 30%, operations research analist 27%). Het is daarom maatschappelijk wenselijk dat de groei van het aantal wiskundestudenten doorzet. Datzelfde geldt voor andere opleidingen in de datawetenschappen, natuurwetenschappen en techniek. Voor al deze studenten is kwalitatief goed wiskundeonderwijs essentieel.

De doorzettende stijging van de studentenaantallen (ook die in aanpalende opleidingen) vormen een tweesnijdend zwaard. De omvang van de staf heeft bij lange na geen gelijke tred gehouden met het groeiende aantal studenten. Hierdoor dreigen de fundamenteën van het Nederlandse wiskundehuis te worden aangetast en staat de Nederlandse bijdrage aan het mondiale wiskundeonderzoek onder druk. Een verbetering van de staf-student ratio is dringend en essentieel. Genderdiversiteit is in de (Nederlandse) wiskunde al vele jaren een specifiek aandachtspunt. Hoewel de instroom van vrouwelijke studenten in de bacheloropleidingen is toegenomen, blijft het percentage vrouwelijke wiskundestudenten steken op 27 procent (cijfers DUO). Van promovendi tot hoogleraren zijn vrouwen ondervertegenwoordigd en door het ontbreken van voldoende rolmodellen dreigt een vicieuze cirkel. Een veelvoud aan initiatieven heeft wel enige verbetering gebracht, maar de ondervertegenwoordiging van vrouwen in de Nederlandse wiskunde is een hardnekkig probleem dat om continue aandacht vraagt. Extra inspanningen zijn ook nodig om de instroom in de wiskundeopleidingen meer een afspiegeling te laten zijn van de samenstelling van de Nederlandse bevolking. Daarbij is vooral aandacht nodig voor eerstegeneratie studenten, zowel bij de werving (flexibele studiepaden, beroepsperspectieven, rolmodellen) als bij het ondersteunen van een succesvolle doorstroom binnen de opleiding.

Recente initiatieven om meer universitair geschoolde wiskundeleraren op te leiden door de route naar de eerste- en tweedegraads bevoegdheden flexibeler te maken, hebben geleid tot een bescheiden toename van de uitstroom. Parallel aan het traject voor wiskundestudenten wordt via MasterMath sinds enkele jaren een reeks nationale lerarencursussen gegeven om studenten die na een andere natuurwetenschappelijke of technische opleiding in de universitaire wiskundelerarenopleidingen instromen, een inhoudelijk stevige en kwalitatief goede wiskundebasis te geven. Verdere verbetering van de aantrekkingskracht van de route tot eerstegraads leraar, bijvoorbeeld door verdere integratie van de vakdidactiek en de wiskundige inhoud, blijft gewenst.

Om bovenstaande ambities te verwezenlijken is een integrale aanpak nodig. Onderwijs en onderzoek zijn in de negen Nederlandse universitaire wiskunde-instituten onlosmakelijk met elkaar verbonden. Investeren in nieuwe vaste posities (universitair (hoofd)docenten en hoogleraren) leidt daarom zowel tot een uitbreiding van de onderwijscapaciteit (voor wiskundestudenten, voor 'service'-onderwijs binnen andere opleidingen, voor lerarenvakken) als tot een krachtige impuls voor het onderzoek. Door deze posities te bundelen binnen profilerende onderzoeksthema's wordt focus en massa gecreëerd op gebieden waar de Nederlandse wiskunde een prominente rol wil spelen in de actuele internationale ontwikkelingen. Om nieuwe gebieden en jonge talenten de ruimte te geven ligt daarbij de nadruk op UD (*tenure track*) posities. Om meer mogelijkheden voor promovendi te creëren zijn de clusters bij uitstek geschikt om tweede-geldstroom middelen over de thema's te verdelen. De genderbalans wordt verbeterd door een deel van de posities specifiek te bestemmen voor vrouwelijke wiskundigen. Deze uitbreiding van de staf biedt ook ruimte om de inspanningen op het gebied van de lerarenopleidingen te intensiveren.

#### 4.5.3 Focusgebieden voor de toekomst

Het Nederlandse wiskundeonderzoek heeft de vier nationale onderzoekclusters DIAMANT, GQT, NDNS+ en STAR als pijlers; zij zorgen voor duurzame landelijke coördinatie. Tegen de achtergrond van dit goed gewortelde wiskundige landschap worden hieronder zeven actuele focusgebieden geïdentificeerd die elk op het grensvlak van twee (of drie) clusters liggen. De gebieden zijn gebaseerd op een brede inventarisatie onder de negen wiskunde-instituten en het CWI. Door nationale inhoudelijke keuzes te maken bij het selecteren van de zeven focusgebieden waarvoor gecoördineerde nieuwe investeringen gewenst zijn, wordt slagvaardig ingespeeld op nieuwe ontwikkelingen waarbinnen de Nederlandse wiskunde zich internationaal kan profileren. De combinatie van lokale speerpunten en nationale coördinatie leidt tot een optimale investering in de Nederlandse wiskunde waarmee vanuit de eigen sterktes ingesprongen kan worden op de vragen van deze tijd. De Nederlandse bijdrage aan het wereldwijde wiskundeonderzoek krijgt een aanzienlijke kwaliteitsimpuls. Zoals onderstaande focusgebieden laten zien, zijn ontwikkelingen in de wiskunde nauw verbonden met die in andere wetenschapsgebieden. Zo sluit de natuurkunde bijvoorbeeld aan bij het eerste en zevende gebied, de econometrie bij het derde gebied, de informatica bij het tweede, vierde, vijfde en zesde gebied, de levenswetenschappen bij het vierde en zevende gebied, en de geowetenschappen bij het zesde gebied. Veel van de gebieden hebben directe of indirecte verbanden met toepassingsgebieden in de industrie en maatschappij. Deze zeven focusgebieden bieden dan ook volop kansen om als wiskundegemeenschap aan te sluiten op de Topsectoren, Horizon 2020 en Horizon Europe. Door haar universele karakter speelt de wiskunde ook in vele NWA-routes een rol, waaronder (niet uitputtend) de routes Bouwstenen (gebieden 1,7), Quantum (gebied 2), Logistiek (gebied 3), Big data (gebieden 4,5) en Oorsprong van leven (gebied 6).

- 1. Symmetrie en meetkunde.** (Huidige zwaartepunten: LEI, RU, RUG, UvA, UU.) Symmetrie ligt verborgen onder allerlei verschijnselen, zowel in de natuur als in de wiskunde: 'zuivere' disciplines als getaltheorie, topologie en meetkunde worden met elkaar verweven (bijvoorbeeld in het zogenaamde Langlands-programma, een nog grotendeels onbegrepen web van wiskundige vermoedens over diepe verbanden), en toepassingen gaan van theoretische fysica tot cryptografie. Dit gebied sluit aan bij GQT en DIAMANT.
- 2. Cryptografie en algoritmes.** (Huidige zwaartepunten: RUG, TUD, UvA.) Het ontwikkelen van cryptografische methoden en algoritmes is gebaseerd op een combinatie van discrete wiskunde, algebra en representatietheorie. Dit heeft toepassingen op gebieden als cybersecurity en privacy. Daarnaast is voor een toekomstige quantumcomputer nieuwe quantumsoftware nodig, en de onderliggende wiskunde van quantumalgoritmen, quantumcryptografie en quantumberekeningen is nog vrijwel onontgonnen terrein. Dit gebied sluit aan bij DIAMANT en GQT.
- 3. Optimalisatie en onzekerheidskwantificatie.** (Huidige zwaartepunten: RUG, TU/e, UT.) Waar optimalisatieproblemen al vele toepassingen kennen, van het bedrijfsleven tot in het ziekenhuis, is het meer en meer nodig om inzicht te krijgen in de kwaliteit van de uitgerekende oplossing: hoe kwantificeren we de onzekerheid in het antwoord als de gegevens die aan de modellering ten grondslag liggen zelf vol ruis en onbekende factoren zitten? Dit gebied sluit aan bij DIAMANT en STAR.
- 4. Netwerken.** (Huidige zwaartepunten: LEI, TU/e, UvA, UT, VU.) In neurowetenschappen en biologie komen complexe netwerken voor, maar bijvoorbeeld ook in elektriciteitsnetwerken en in de logistiek. Om statistisch relevante uitspraken te kunnen doen op grond van de data die gegeneerd zijn door de actoren binnen zo'n (autonoom of juist zorgvuldig ontworpen) interactienetwerk, zijn zowel nieuwe



wiskundige technieken (statistiek, kansrekening, combinatoriek, discrete wiskunde, speltheorie, dynamische systemen) als algoritmes nodig. Dit gebied sluit aan bij STAR, DIAMANT en NDNS+.

5. **Statistisch leren.** (Huidige zwaartepunten: LEI, RU, TUD, TU/e, UvA, UT, VU.) Actuele ontwikkelingen in (*deep*) *machine learning* en kunstmatige intelligentie leiden tot nieuwe vragen op het gebied van empirische processen, statistisch leren, approximatietheorie en computationele optimalisatiemethoden. De ontwikkelde wiskunde zal het fundament vormen voor de verdere ontwikkeling van *machine learning* technieken. Dit gebied sluit aan bij STAR en NDNS+.
6. **Dynamische data.** (Huidige zwaartepunten: LEI, RU, RUG, TU/e, UT, UU, VU.) Het integreren van data in modellen die dynamische processen beschrijven is essentieel voor het voorspellend vermogen van het model (denk bijvoorbeeld aan de weersverwachting, klimaatmodellen en verkeersdrukte). Mathematische statistiek en de theorie van dynamische systemen gaan hier hand in hand, waarbij modelreductie en inverse problemen een centrale rol spelen, maar ook systeem- en regeltheorie en stochastische aspecten zoals *rare-event estimation*. Dit gebied sluit aan bij NDNS+ en STAR.
7. **Geometrische en stochastische evolutie.** (Huidige zwaartepunten: LEI, RU, TUD, VU.) De bewegingen van objecten en materialen die van vorm veranderen kunnen beschreven worden met behulp van partiële differentiaalvergelijkingen. Hoewel daarover in eenvoudige gevallen al veel bekend is, hebben de evoluties die in toepassingen van belang zijn (van viscoelastische vloeistoffen tot celwanden en zwaartekrachtgolven) vaak een geometrisch en/of stochastische component, waarvan de invloed meestal nog onbegrepen is. Dit gebied sluit aan bij NDNS+, GQT en STAR.

## 5 Overige disciplines binnen de bètasector

### 5.1 Aanjagende werking van de sectorplannen

Zoals in hoofdstuk 3 beschreven is om diverse redenen in het aankomende sectorplan gekozen voor een versterking van de informatica, natuurkunde, scheikunde en wiskunde. Dit wil echter niet zeggen dat de in hoofdstuk 2 en 3 beschreven problematiek niet zou gelden voor de overige bètadisciplines – te weten de aard- en milieuwetenschappen, astronomie, biologie en farmacie. De meeste van deze disciplines hebben ook een grote toename in de studentenaantallen gezien, en/of kampen met een terugloop in de onderzoekspecialisatie van Nederland. Onverkort geldt dat ze onderdeel zijn van het bètadomein en daarbinnen elk een belangrijke eigen rol hebben in het beantwoorden van existentiële vragen, het brengen van vernieuwingen in de (maak)industrie en het bijdragen aan de grote maatschappelijke vraagstukken. Daarnaast zijn ze door thematische samenwerkingen op gebieden als levenswetenschappen en klimaat nauw verbonden met de disciplines die worden versterkt in het komend sectorplan.

De aankondiging van dit sectorplan heeft ook in de aard- en milieuwetenschappen, astronomie, biologie en farmacie geleid tot enthousiasme voor de integrale aanpak en het versterken van de disciplinaire basis. Daar waar deze disciplines nationaal al sterk georganiseerd waren zijn de banden nauwer aangehaald, en daar waar een dergelijke traditie nog niet zo sterk bestond is in korte tijd grote voortgang geboekt met het opstarten en aanjagen van nationale overlegorganen. Hierdoor heeft elk van deze disciplines een nationaal gedragen beschrijving van het huidige landschap, omgevingsanalyse en toekomstvisie opgesteld. Deze volgen hieronder.

### 5.2 Aard- en milieuwetenschappen

#### 5.2.1 Universitaire landschap

Brede aard- en milieuwetenschappelijke opleidingen en onderzoeksinstituten hebben zich ontwikkeld aan de VU en UU, technische aardwetenschappen aan de TUD, fysische geografie, bodemkunde en milieuwetenschappen aan de WUR, RUG en UvA, aardobservatie aan de UT, en studies van het metabolisme in het economisch en natuurlijke systeem aan onder andere LEI. De RUG kent verder een leerstoel toegepaste geo-energie, die tevens onderdeel is van de masteropleiding Energy and Environmental Sciences. Daarnaast zijn de sociale geografie en planologie, en innovatie-, milieu- en energiewetenschappen onderdeel van de brede faculteit Geowetenschappen (UU) en zijn er drie bacheloropleidingen: Aarde en Economie (VU), Future Planet Studies (UvA) en Global Sustainability Science (UU), die nauw verweven zijn met de klassieke aardwetenschappelijke opleidingen. Ook is er een aantal masteropleidingen binnen de technische universiteiten en natuurwetenschappelijke faculteiten zoals Engineering and policy analysis aan de TUD, de LEI-TUD joint degree Industrial ecology, en Climate studies en Environmental sciences aan de WUR. Naast de universiteiten kent Nederland een groot aantal RKI-, TO2- en NWO- en KNAW-instituten waar geconcentreerd (toegepast) aard- en milieuwetenschappelijk onderzoek wordt uitgevoerd, zoals Naturalis, Deltares, WENR, WMR, KNMI, NIOZ, NIOO, de Geologische dienst van TNO, Alterra, ECN en SRON.

De sector heeft geen lange historie van strategische agenda's en *roadmaps*, maar door een actief beleid van focus en massa en de vroege vorming van interuniversitaire onderzoekscholen en nationale onderzoeksprogramma's, is er een goede afstemming en synergie voor een groot aantal onderzoeksgebieden. Het onderzoek/onderwijs is overwegend multidisciplinair, waarbij structureel elementen zijn geïntegreerd vanuit de natuurkunde, scheikunde, (micro)biologie en toegepaste wiskunde en informatica. De kennis richt zich op het 'Systeem Aarde' in alle facetten, dat wil zeggen de ontwikkeling van- en interactie tussen alle sferen van de aarde vanaf haar ontstaan, inclusief de recente rol van menselijk handelen in dit systeem. Voor het onderzoek wordt gebruik gemaakt van een groot aantal nationale en Europese of internationale analytische en ICT faciliteiten, experimentele opstellingen,

platforms en netwerken. Uit visitaties en internationale ranglijsten blijkt dat de kwaliteit van het onderzoek en onderwijs zeer goed tot uitstekend is.

### 5.2.2 Omgevingsanalyse

Gegeven het feit dat de invloed van de mens op het Systeem Aarde steeds groter wordt, neemt ook het maatschappelijk belang toe van enerzijds inzicht in hoe deze invloed tot stand komt en anderzijds welke effecten dit handelen heeft (bijvoorbeeld op klimaat of biodiversiteit). Dit omvat fundamenteel onderzoek naar de gevoeligheid van het systeem, de (niet-lineaire) processen die daarbij een rol spelen en de voorspelbaarheid, maar ook toegepast onderzoek voor het ontwikkelen en kritisch testen van (innovatieve) oplossingen, adaptatiestrategieën en risicoanalyses. Dat de aard- en milieuwetenschappen daarbij een belangrijke rol moeten vervullen staat vast en wordt ook bevestigd door de vervijfvoudiging van het aantal bachelor- en masterstudenten sinds het begin van deze eeuw, waarbij het aandeel bachelorstudenten met een gamma-achtergrond nu de helft van de populatie beslaat. Het ligt in de verwachting dat een verdere verbreding binnen de sector aard- en milieuwetenschappen zal doorzetten (het Systeem Aarde in relatie tot het Systeem Wereld), waarbij het risico bestaat dat dit ten koste gaat van de verdieping die verankerd is in een aantal kleinere, meer specialistische aard- en milieuwetenschappelijke disciplines.

Om de grote maatschappelijke thema's op het gebied van klimaat, water, natuurrampen, energie, duurzaamheid en de beschikbaarheid van grondstoffen adequaat te onderzoeken zijn grootschalige infrastructurele voorzieningen noodzakelijk, zoals observatoria op het land, in zee, diep in de ondergrond en in de ruimte, die in het algemeen alleen met internationale onderzoeksprogrammering zijn te realiseren. Het is voor de sector aard- en milieuwetenschappen daarom van groot belang dat Nederland zich zowel financieel als wetenschappelijk structureel committeert aan deze programma's om de sterke internationale positie te kunnen handhaven.

De unieke verbindingen tussen de universitaire en niet universitaire kennisinstellingen binnen de sector aard- en milieuwetenschappen bieden daarnaast een uitgelezen kans om de kennisketen tussen fundamenteel en toegepast onderzoek te versterken, gegeven het feit dat het maatschappelijke belang van de kennis van het Systeem Aarde in de toekomst zal toenemen. Tot op heden neemt de sector aard- en milieuwetenschappen slechts een beperkte positie in binnen de Topsectoren, met uitzondering van enkele activiteiten rondom water en de Groningse ondergrond, en de Nationale Wetenschapsagenda (NWA), waarbij het accent vooralsnog ligt op energietransitie en de oorsprong van leven op aarde en in het heelal. Er is behoefte aan een duidelijke NWA-route op het gebied van klimaat, dat nu versnipperd in verschillende routes is opgenomen. Cruciaal is en blijft de (nationale) wetenschapsfinanciering voor fundamenteel onderzoek via NWO Open Competitie en Vernieuwingsimpuls, en Europese (internationale) persoonsgebonden beurzen (ERC), training netwerken (ITN) en EU-H2020 programmering.

### 5.2.3 Uitdagingen voor de toekomst

Een van de grootste uitdagingen in de aard- en milieuwetenschappen is om de niet-lineaire processen binnen het Systeem Aarde en haar deelsystemen, inclusief het economische systeem, beter te kwantificeren. Door de continue ontwikkeling en toepassing van moderne meettechnieken, observatoria, numerieke modellen en de vergelijking tussen data en simulaties is de verwachting dat een goed beeld kan ontstaan van die processen, waardoor ook de nauwkeurigheid van projecties kan worden verbeterd. Uitdagingen liggen er in de continuïteit van deze ontwikkelingen en nauwere (internationale) samenwerking met rekencentra en ondersteunende instellingen (bijvoorbeeld eScience center). Ook zullen belangrijke wetenschappelijke stappen moeten worden gezet, zoals de implementatie van verbeterde computertechnieken (*machine learning*), de koppelingen tussen de verschillende sferen (*earth system models*) en de analyse van grote hoeveelheden gegevens (*big data*). Naast nieuwe investeringen in meetapparatuur en rekenkundige uitdagingen vergt dit ook aanpassingen van huidige onderwijscurricula, zodat nieuwe generaties studenten deze kennis effectief kunnen toepassen, zowel binnen als buiten de universitaire omgeving. Als voorbeeld: toekomstige projecties van klimaatveranderingen zullen ook de langzame terugkoppelingen in het Systeem Aarde in beschouwing moeten gaan nemen, waardoor niet alleen de gevoeligheid van de opwarming van de aarde kan worden bepaald, maar ook de kans op extreme

gebeurtenissen, zoals vloedgolven, modderstromen en hagelstormen beter kan worden geanalyseerd en gecommuniceerd naar de eindgebruikers. De sector aard- en milieuwetenschappen vervult een belangrijke rol binnen de door Verenigde Naties geformuleerde duurzaamheidsdoelstellingen.

## 5.3 Astronomie

### 5.3.1 Universitaire landschap

Er zijn vier astronomieopleidingen en -instituten in Nederland - aan de UvA, RUG, LEI en RU – die samen verenigd zijn in de Nederlandse Onderzoekschool voor de Astronomie (NOVA). NOVA's missie is om topwetenschappelijk onderzoek uit te voeren, jonge astronomen op te leiden tot het hoogste internationale niveau en om de ontdekkingen en technieken te delen met de maatschappij. Het onderzoek is georganiseerd langs drie hoofdlijnen, waarbij scherpe keuzes zijn gemaakt: (1) Oorsprong en evolutie van sterrenstelsels, vanaf de Big Bang tot heden; (2) Vorming en evolutie van sterren en planetenstelsels; en (3) Astrofysica onder extreme condities. Nieuwe onderzoeksterreinen zoals donkere materie en donkere energie komen aan bod in (1), exoplaneten in (2) en de astrofysica van zwaartekrachtgolfbronnen in (3). Afstemming hierover vindt plaats binnen NOVA. Een kernpunt van de strategie is een geïntegreerd onderzoek- en instrumentatieprogramma. Recente internationale evaluaties geven NOVA consistent het predicaat 'exemplarisch', dat wil zeggen gezamenlijk behorend tot de top vijf instituten in de wereld. De hoge kwaliteit blijkt ook uit het relatief grote aantal Advanced ERC grants, Spinoza en internationale prijzen, en uit het succes van promovendi bij het verkrijgen van de meest prestigieuze *fellowships* wereldwijd.

### 5.3.2 Omgevingsanalyse

Moderne sterrenkunde vindt plaats in grote internationale samenwerkingsverbanden om de grootste telescopen wereldwijd en in de ruimte te realiseren en te gebruiken. NOVA fungeert als thuisbasis voor de European Southern Observatory (ESO) dat toegang geeft tot de grote optische telescopen (VLT) en de wereldwijde submillimeter telescopen (ALMA). ESO bouwt ook de ELT met een spiegel van 39 meter doorsnede. Daarmee complementeert NOVA de NWO-instituten ASTRON (radiosterrenkunde, thuisbasis voor SKA) en SRON (onderzoek vanuit de ruimte, thuisbasis voor ESA). De universitaire instituten en ASTRON en SRON analyseren gezamenlijk de data van de verschillende faciliteiten. Er zijn wetenschappelijke dwarsverbanden met de natuurkunde, informatica, wiskunde, chemie, biologie en geologie, en er wordt samengewerkt met de TUD, TU en TU/e, ESA-ESTEC, TNO-SPACE en Nikhef, en met industrie zoals VDL-ETG. Sterrenkunde is prominent aanwezig in de NWA-routes 'Oorsprong van het leven' en 'Bouwstenen van materie en fundamente van ruimte en tijd'. Studentenaantallen zijn gegroeid met factoren twee à drie over de laatste paar jaar terwijl het aantal vaste stafleden (ongeveer twintig procent is vrouw) gelijk is gebleven. De meeste afgestudeerde studenten vinden vrijwel direct goede banen.

### 5.3.3 Uitdagingen voor de toekomst

Top astronomie = top talent + top instrumentatie. De Nederlandse sterrenkunde speelt internationaal een belangrijke en sturende rol. Cruciaal voor dat succes zijn (i) het aantrekken, ontwikkelen en behouden van talent (met als belangrijk doel het vergroten van de diversiteit) en direct daaraan gekoppeld (ii) een essentiële partner zijn in wereldwijde samenwerkingen voor het bouwen van instrumentatie om de grootste wetenschappelijke vragen (bijvoorbeeld 'Zijn wij alleen?') aan te pakken. De grote uitdaging is om die sterke rol vast te houden bij instrumentatieprojecten die vijftien tot twintig jaar vergen, terwijl NOVA geen langetermijnfinanciering heeft (de huidige financiering loopt in 2023 af).

## 5.4 Biologie

De biologie vormt het sterke fundament onder de brede levenswetenschappen, bedreven aan Nederlandse universiteiten en hun ziekenhuizen, instituten van onder meer de KNAW en bedrijven. Dit disciplinebeeld beperkt zich tot de biologie als discipline zoals te vinden bij de zes brede universiteiten en de WUR, waar

studenten na een bachelor biologie als bioloog kunnen afstuderen. Het beeld dekt dus niet de biofysica en biochemie, die in de beschrijving van de natuur- en scheikunde is opgenomen in hoofdstuk 4, en niet de interdisciplinaire opleidingen met biologie als onderdeel aan TU's en andere universiteiten. Het gaat hier om de fundamentele nieuwsgierigheidsgedreven biologie als basis voor meer toegepaste onderdelen van de levenswetenschappen, dus wel biologie van mens of dier maar niet de klinische of farmaceutische (dier)geneeskunde en wel de biologie/ecologie van natuurlijke/agrarische systemen, maar niet de praktische natuurbescherming of de landbouw.

#### 5.4.1 Universitaire landschap

De Nederlandse universitaire biologie staat internationaal aan de top. De 2018 Shanghai ranking plaatst het biologisch onderzoek van zeven universiteiten bij de mondiale beste 100. De Verkenning Nieuwe Biologie (2011) identificeerde vijf kerndisciplines waarop Nederland focus, massa en impact heeft. In het gebied 'van molecuul en gen tot organisme' waren dit cel- en ontwikkelingsbiologie en fysiologie, neuro- en gedragsbiologie. Op het niveau van 'organismen in hun omgeving' waren dit plantenbiologie, ecologie, evolutiebiologie en microbiologie. Daarnaast dragen Nederlandse groepen significant bij aan belangrijke opkomende velden en technologieën zoals systeembio, bio-imaging, bioinformatica, biodiversiteit en natuurlijke producten, synthetische biologie en nanobiologie. Dwarsverbanden bestaan met geneeskunde (genetica, neuro, gezondheid, ouderdom en regeneratieve geneeskunde), chemie en fysica (biochemie en biofysica; structuur, dynamica, -omics, de synthetische cel), aard- en milieuwetenschappen (ecosystemen, oceanen, klimaat, urbane omgeving) en landbouwwetenschappen (biotechnologie, voedselzekerheid en -veiligheid). Alle faculteiten bieden een brede solide basis in onderzoek, onder andere door het aanbieden van onderzoeksstagemogelijkheden in een brede biologieopleiding. Tegelijkertijd streeft de sector naar een heldere onderzoeksprofilering. Er is een grote dynamiek in het onderzoek; een voorbeeld hiervan is de Nature4Life-agenda. Er zijn daarom plannen voor een geactualiseerde analyse van sterktes en potentieel van de verschillende onderzoekscentra.

#### 5.4.2 Omgevingsanalyse

In 2018 schreven meer dan duizend nieuwe bachelorstudenten zich in bij biologie. Dit grote aantal is gewenst: afgestudeerde biologen vinden gemiddeld na drie maanden een baan met minder dan vijf procent werkloosheid na één jaar. Meer dan de helft werkt in 'life sciences & health' of in het onderwijs, beide sectoren met grote voorziene tekorten tot 2022. Echter, de instroom verdubbelde in vijftien jaar en dit resulteerde in een verder stijgende student-stafratio. Daarnaast wordt de biologie gevraagd om kernbijdragen aan tal van nieuwe interdisciplinaire BSc opleidingen, zoals bioinformatica, *global sustainability science*, *future planet studies*, medische biologie en psychobiologie. Ten slotte is er een aanzienlijk aantal feitelijke biologieopleidingen onder een andere naam (bijvoorbeeld plantenwetenschappen). Dit zet, naast de sterk toegenomen student-stafratio, het huidige personeelsbestand onder druk.

#### 5.4.3 Uitdagingen voor de toekomst

De biologie zal een hoofdrol spelen in de gezamenlijke maatschappelijke thema's van NWA en topsectoren 2.0: gezondheid & zorg, land- en tuinbouw, voedsel & water, energietransitie & duurzaamheid, en veiligheid. Biologisch onderzoek is essentieel voor de aanpak van mondiale uitdagingen: voeding voor ieder, klimaatverandering, gezonde leefomgeving/leefbare stad, biodiversiteit, duurzaamheid en circulaire economie. Nationaal streeft de sector naar een sterk landelijk masterplan biologieopleidingen, met duidelijke taakverdeling tussen universiteiten, gekoppeld aan geprofileerd, sterk onderzoek met excellente (grote) onderzoeksfaciliteiten. Belangrijke innovaties in het onderwijs zetten in op sleutelvaardigheden, *life-long learning* en aansluiting op wensen van de arbeidsmarkt: alle biologen moeten zowel computationeel, moleculair als evolutionair en systeembioologisch opgeleid worden. Een investering in de biologie zal het de sector mogelijk maken met innovaties in onderzoek en onderwijs een nieuwe generatie biologen op te leiden, die gaan werken aan de grote maatschappelijke uitdagingen op onze planeet.

## 5.5 Farmacie

### 5.5.1 Universitaire landschap

Farmacie is een multidisciplinair wetenschapsgebied waarbij de fundamentele bètawetenschappen worden ingezet voor ontdekking, ontwikkeling en gebruik van geneesmiddelen. Kenmerkend is de volledige integratie van de verschillende wetenschappen gericht op het geneesmiddelenonderzoek. In Nederland vallen de farmacieopleidingen in Groningen, Leiden en Utrecht onder de bètafaculteiten waar apothekers en onderzoekers worden opgeleid. In alle betrokken instituten wordt gewerkt aan nieuwe concepten voor de ontdekking en optimalisatie van geneesmiddelen, zowel voor kleine moleculen, biopharmaceuticals en celtherapieën. Focus van het onderzoek aan de UU ligt op veiligere en door biologie geïnspireerde geneesmiddelen en therapeutische strategieën, inclusief regulatie van geneesmiddelen. Het onderzoek aan de RUG richt zich op geavanceerde (humane) in vitro en ex vivo modellen voor geneesmiddelontwikkeling en biotechnologische productengineering. LEI werkt aan geavanceerde imaging technieken voor *target discovery* en innovatieve systeemfarmacologische en biotherapeutische concepten. Alle drie de instituten werken samen aan omics-technologieën om de geneesmiddelwerking voor specifieke patiëntgroepen te verbeteren.

### 5.5.2 Omgevingsanalyse

In Nederland werken 65.000 mensen in de geneesmiddelenontwikkeling en 165.000 in de hele geneesmiddelensector (bron PWC). De ontwikkeling vindt voornamelijk plaats op science campussen, waar kennisinstellingen, UMC's en 420 geneesmiddelbedrijven (waaronder meer dan 200 innovatieve start-upbedrijven) onder andere via de succesvolle incubatoren samenwerken. Ten opzichte van Europa vertoont Nederland een forse groei in biotechnologische bedrijven, met daaraan gerelateerde arbeidsplaatsen en patenten. Met de federatie voor innovatief geneesmiddelenonderzoek (Figon) heeft Nederland een uniek platform voor onderzoekssamenwerking. Met de komst van de EMA naar Amsterdam zal het aantal bedrijven en het daarmee gepaard gaande aantal arbeidsplaatsen sneller groeien dan de universiteiten nu kunnen opleiden. Het is belangrijk dat apothekers en onderzoekers worden opgeleid om nieuwe ontwikkelingen en groei in het werkveld te ondersteunen.

### 5.5.3 Uitdagingen voor de toekomst

De doorbraak van de immuuntherapie is een steun in de rug voor de biotechnologie. De ontwikkelingen op het gebied van de 'Personalised medicine' (een belangrijke route binnen de NWA) zullen de farmacotherapie ingrijpend veranderen. Daarnaast zal de focus in toekomstig onderzoek op regeneratieve en/of *cell-based* therapieën liggen. Het uiteindelijke maatschappelijke doel is om tot veiligere, effectievere én betaalbare medicijnen te komen. In de ontwikkeling van deze nieuwe geneesmiddelen zullen proefdieren in belangrijke mate vervangen gaan worden door geavanceerde (humane) ex vivo weefsel- en orgaankweeksystemen. Farmacotherapie zal gebaseerd zijn op omics-technieken en *bigdata*-analyse, en zullen aspecten vanuit de kunstmatige intelligentie en *computational sciences* een significante rol gaan spelen. Farmacotherapeutische behandeling van patiënten zal vaker met bio(techno)logische producten plaatsvinden dan nu het geval is. De huidige farmacieopleidingen hebben steun nodig om op academisch niveau mensen in deze nieuwe ontwikkelingen op te leiden.

## 6 Op weg naar nationale profilering

### 6.1 Landschapsanalyse van de participerende universiteiten

De participerende universiteiten zijn alle gevraagd een korte schets aan te leveren van de huidige organisatie en van het landschap waarin zij werkzaam zijn, alsook van relevante veranderingen in dit landschap. De huidige zwaartepunten van de universiteiten in de geprioriteerde disciplines die daaruit naar voren kwamen zijn opgenomen in de beschrijving van de focusgebieden in hoofdstuk 4. De volledige beschrijving en omgevingsanalyse per universiteit is opgenomen in bijlage A; deze paragraaf bevat een beknopte samenvatting daarvan.

Bijna alle participerende universiteiten kennen inmiddels één brede bètafaculteit waarin de disciplines zoals beschreven in hoofdstuk 3 en 4 zijn ondergebracht – voor zover ze tenminste aan de betreffende universiteit worden onderzocht en gedoceerd. In dit landschap nemen TU/e, RUG, UM en WUR een ietwat bijzondere positie in. TU/e kent nog de traditionele indeling van disciplinaire faculteiten en clustert vier daarvan in het bètadomein. RUG hanteert naast elkaar een algemene en een technische variant van de natuur-, schei-, en wiskunde. UM heeft pas zeer recent een bètafaculteit opgericht waardoor alles nog volop in ontwikkeling is. En tot slot kent WUR een unieke thematische organisatiestructuur rondom enkele concrete toepassingsgebieden binnen het domein voeding en leven. Verder zijn de vergaande samenwerkingsverbanden tussen de faculteiten van LEI-TUD en UvA-VU noemenswaardig. Ook is er de 4TU federatie en meer recent een strategische alliantie tussen de bètafaculteiten van TU/e en UU.

Uit de door de faculteiten aangeleverde kengetallen blijkt dat zij vrijwel alle een vergelijkbare omvang (plusminus 20 procent) hebben binnen de geprioriteerde disciplines. Uitzonderingen hierop zijn TUD die significant groter is en UM en WUR die significant kleiner zijn. Dit laatste komt tevens doordat UM en WUR geen onderzoeksactiviteiten hebben binnen de kernwiskunde en de WUR ook niet binnen de kerninformatica. Bij vrijwel alle faculteiten wordt duidelijk dat herstel van een gezonde student-stafratio een speerpunt is, met name bij de informatica. Daarnaast is er bij veel faculteiten een behoefte aan het versterken van noodzakelijke onderzoekinfrastructuur en ondersteunende staf (technici), in het bijzonder voor de natuur- en scheikunde. Voor alle disciplines en vrijwel alle faculteiten geldt dat er sprake is van een onevenwichtige genderbalans in zowel student- als stafpopulatie.

De beschrijvingen van de faculteiten laten zien dat het onderzoeksprogramma in grote mate bepaald wordt door de eventuele aanwezigheid van naburige medische centra of nationale onderzoeksinstituten zoals van de KNAW en NWO. Ook de aanwezigheid van grootschalige onderzoeksfaciliteiten heeft veel invloed, zoals in het geval van HFML-FELIX te Nijmegen, het NanoLab in Twente, of het reactorinstituut Delft. Verder zijn samenwerkingsverbanden met (lokale of regionale) industrie en bedrijvigheid merkbaar, te denken valt aan de sterke verwevenheid van UM met het bedrijvenpark Chemelot via Brightlands, de samenwerking van UvA en VU met ASML in ARCNL, TU/e met Brainport Eindhoven of de samenwerkingsverbanden van de WUR met de rondom gelegen agrofoodindustrie zoals FrieslandCampina, Rijk Zwaan en Unilever. Bovenop en verankerd in de lokale onderzoeksprogramma's zorgen Zwaartekrachtprogramma's en gezamenlijk gevoerde faciliteiten in het kader van de Nationale Roadmap Grootschalige Wetenschappelijke Infrastructuur voor sterke onderlinge kruisverbanden, zoals in het Quantum Software Consortium, NanoLabNL, MCEC, et cetera.

In de beschrijving van hun activiteiten per discipline hebben de universiteiten elk gemotiveerde keuzes aangeleverd voor de focusgebieden waarop ze voor de toekomst in willen zetten. Deze keuzes zijn in de disciplinaire overleggen onderling afgestemd en ook in het bètadecanenoverleg besproken, om zo tot een gebalanceerde nationale profilering over de focusgebieden te komen. In de volgende paragrafen wordt de profilering per discipline schematisch weergegeven en besproken.



## 6.2 Nationale profilering van de informatica

De matrix geeft de focusgebieden binnen de informatica weer, waarop de universiteiten de komende jaren willen inzetten. Ook zijn de keuzes voor de toekomst van het CWI en de informaticagroepen aan de niet-bètafaculteiten weergegeven. Aangezien zij geen versterking ontvangen uit dit sectorplan zal deze inzet vanuit eigen middelen plaatsvinden.

Tabel 8: Profileringsmatrix van de informatica.

	Focusgebied	Participerende universiteiten										Overige IPN leden			
		LEI	RU	RUG	TUD	TU/e	UvA	UM	UT	UU	VU	OU	TiU	WUR	CWI
Data science & AI	Data modeling & analysis		1	1	1		1	1		1	1	1	1	1	
	Machine learning	1	1	1		1	1	1					1		1
	Machine reasoning & interaction	1		1	1			1	1	1	1	1	1	1	
	Algoritmie	1				1					1				1
	Software		1	1	1				1	1		1		1	1
	Security en privacy		1			1	1		1		1	1			1
	Genetwerkte CS & ES	1			1	1	1		1		1				

Als motivatie voor de inzet op specifieke focusgebieden wordt door de faculteiten primair een voortbouwen op bestaande sterktes genoemd. Door de explosieve groei van het vakgebied en de studentenaantallen dreigen basisgebieden subkritisch te worden. Er lijkt dan ook geen ruimte om nieuwe zwaartepunten in te richten en men richt zich over de gehele linie op het behouden en versterken van bestaande zwaartepunten. Deze zijn vaak logisch ingegeven door de facultaire inbedding. Zo zet bijvoorbeeld Leiden in op het verder ontwikkelen van beeldverwerking en patroonherkenning met AI, wat goed aansluit bij de behoeften vanuit deze sterk *life sciences* gedreven faculteit – en bijvoorbeeld VU op security & privacy en genetwerkte computer- en *embedded* systemen, wat goed aansluit op de bewezen sterkte in het quantumsoftwareonderzoek zoals ingebed in QuSoft. Het enige nieuwe zwaartepunt dat wordt beoogd is verder uitbouwen van deze uitgangspositie van de VU door extra in te zetten op *data modelling and analysis* en zo de verbinding met het Data Science en AI thema te versterken. Uit de keuzes blijkt opnieuw de absolute noodzaak van de informatica om de bestaande basis te versterken. De lang uitgebleven broodnodige investeringen hebben geleid tot verschraving van onderzoek en onderwijs, en met de sectorplanmiddelen wordt nu een belangrijke eerste stap gezet in de reparatie hiervan.

Deze versterking van de basis wil overigens niet zeggen dat er met deze keuzes geen vernieuwing plaatsvindt. Sterker nog, het is juist door het repareren van de basis dat er nu weer ruimte komt om te werken aan de grondslagen van de informatica. De vernieuwing bevindt zich dan ook niet zo zeer in het oprichten van nieuwe zwaartepunten, maar in de herleving van bestaande sterktes zodat de krachtige uitgangspositie van de Nederlandse informatica in internationaal perspectief gehandhaafd kan worden.

### 6.3 Nationale profilering van de natuurkunde

In de onderstaande tabel heeft elke participerende universiteit met vier punten aangegeven op welke focusgebieden ze hun activiteiten willen intensiveren. Voor een compleet beeld zijn ook de relevante NWO-instituten weergegeven. Aangezien zij geen versterking ontvangen uit dit sectorplan zal de inzet daar vanuit eigen de middelen plaatsvinden.

Tabel 9: Profileringsmatrix van de natuurkunde.

Focusgebied	Participerende universiteiten											Fysica instituten			
	LEI	RU	RUG	TUD	TU/e	UvA	UM	UT	UU	VU	WUR	AMOLF	ARCNL	DIFFER	Nikhef
Particle & gravitational physics	1	1,5	1			1,5	1		1,5	1					2
Quantum materials & technologies	1	1	1	1,5	1	1,5		1	1				1		
Complex systems, soft matter & fluids	1				1	1		1	1		2,5	1			
Life & health	1		1	1			2	1		1,5	1,5	1,5			
Energy & sustainability		0,5	1	0,5	1,5			1	0,5	0,5		1,5		3	
Precision measurement & fabrication		1		1	0,5		1			1			3	1	2

De keuzes die de universiteiten binnen de natuurkunde maken blijken, meer nog dan bij enig andere discipline, ingegeven door de aanwezigheid van onderzoeksinstituten en –faciliteiten, of de participatie in samenwerkingsverbanden die hier toegang toe geven. Dit komt prominent tot uitdrukking in de agenda voor het focusgebied *particle & gravitational physics*, die grotendeels gedictieerd wordt door de keuzes in het Nikhef samenwerkingsverband. Deze keuzes vloeien op hun beurt weer voort uit internationale *roadmaps* vanuit bijvoorbeeld CERN. Hetzelfde is zichtbaar in de keuzes die LEI en TUD hebben gemaakt om te anticiperen op de komst van SRON, de sterke synergie op het gebied van plasmafysica tussen TU/e en DIFFER, of de inzet vanuit RU op *precision measurement & fabrication* door de aanwezigheid van de HFML-FELIX faciliteit. De nabijheid van een UMC is ook richtinggevend voor keuzes, zoals zichtbaar wordt in de motivatie van LEI, RUG en UM om in te zetten op het focusgebied *life & health*.

Eerdere profileringsplannen in het kader van het vorige Sectorplan Natuur- en Scheikunde (SNS) maken het mogelijk om de ontwikkeling in de zwaartepunten in een langjariger perspectief te beschouwen. Uit een vergelijking van de huidige zwaartepunten met die van 2008 blijkt dat er de nodige dynamiek en vernieuwing heeft plaatsgevonden. Zo was er in 2008 nog nauwelijks sprake van de huidige sterke interesse in het onderzoek aan zwaartekrachtgolven. Prominente voorbeelden van wat de zwaartepunten uit 2008 hebben gebracht zijn het in tien jaar tijd opgebouwde quantum(technologie) onderzoek waarop het nationaal icoon QuTech is gebaseerd, of de enorme intensivering van het funderend energieonderzoek die over diezelfde tijd heeft plaatsgevonden. Het valt dan ook te verwachten dat de Nederlandse natuurkunde met deze hernieuwde nationale profilering tot grotere hoogten wordt gebracht, waarmee de positie aan de wereldtop bestendig kan worden.

## 6.4 Nationale profilering van de scheikunde

Elk van de deelnemende universiteiten heeft met maximaal vier punten in onderstaande tabel aangegeven op welke focusgebieden ze zich de komende jaren willen gaan versterken. Hierbij worden huidige zwaartepunten versterkt en nieuwe opgezet.

Tabel 10: Profileringsmatrix van de scheikunde.

		Participerende universiteiten										
Focusgebied		LEI	RU	RUG	TUD	TU/e	UvA	UM	UT	UU	VU	WUR
Chemische technologie & conversie	Procestechnologie & chemical engineering			0,5	1	1	1		1			
	Biotechnologie				1			0,5				
	(Bio)katalyse	1	0,5		0,5	0,5	1,5	0,5		1		
Chemie van materialen	Functionele materialen			0,5	1	1		1	0,5	0,5		1,5
	Nanoscience & hybride materialen								1	0,5	1	
Chemie van leven	Chemische biologie	1	1		0,5	0,5		0,5			1	0,5
	Medicinale chemie	0,5	0,5	1,5								
	Structuurbiologie			1						1,5		
Complexe moleculaire systemen	Supramoleculaire chemie	1,5		*	1		1					
Fundamenten van de chemie en chemische methodes	Analytische chemie en spectroscopie		0,5				1,5	1		0,5	0,5	1
	Computationele chemie	1	0,5	0,5	1				0,5			
	Synthese	0,5		1							0,5	

\* Het zwaartepunt supramoleculaire chemie aan de RUG neemt een bijzondere plaats in door de enorme stimulans van de Nobelprijs 2016.

Bij de beschrijving van de focusgebieden voor de scheikunde is gekozen voor zowel een indeling op meer overkoepelende gebieden (chemische technologie & conversie, chemie van materialen, et cetera) als op specifieke onderliggende sub-disciplines (structuurbiologie, katalyse, et cetera). Daarnaast geldt dat het focusgebied 'fundamenten van de chemie en chemische methodes' eigenlijk dwars door alle bovenliggende focusgebieden heen snijdt en de methodes beschrijft die hierbij worden ingezet. De onderlinge verbondenheid van focusgebieden, sub-disciplines en methoden is kenmerkend voor de scheikunde, die als discipline ook middenin het bètadomein ligt en sterke connecties heeft naar alle andere bètadisciplines.

Deze verbondenheid is ook terug te zien in de beschrijving van de faculteiten en uit zich in zwaartepunten rondom thema's waar de faculteit ook sterktes heeft in nevengelegen disciplines. Een concreet voorbeeld is de inzet van de UT op procestechnologie & chemical engineering en nanoscience & hybride materialen, wat perfect aansluit op hun discipline-overstijgende clusters Bioengineering Technologies en Nanoelectronic Materials and Thin Films, en hun sterkte in het maken van *labs-on-a-chip* in het MESA+ NanoLab. Een ander voorbeeld is de scheikunde in Utrecht, die ofwel in nauwe verbondenheid met de natuurkunde is ondergebracht in het Debye Institute for Nanomaterials Science, of in nauwe verbondenheid met de biologie en farmacie in het Bijvoet Center for Biomolecular Research. Voortbouwend op deze sterke uitvalsbasis wordt vervolgens door de UU ingezet op zwaartepunten in enerzijds de functionele materialen en nanoscience & hybride materialen en anderzijds de structuurbiologie.

Ook voor de scheikunde geldt dat door het vorige Sectorplan Natuur- en Scheikunde (SNS) een vergelijking gemaakt kan worden met de situatie in 2008. Uit die vergelijking blijkt dat ook hier de zwaartepunten hun waarde hebben bewezen, het meest prominente voorbeeld is de bekroning van het toenmalige zwaartepunt 'supramoleculaire chemie en *systems chemistry*' aan de RUG met de Nobelprijs voor Ben Feringa in 2016. Uit de vergelijking blijkt ook dat er sinds 2008 een sterk toegenomen aandacht is voor de fundamentele van de chemie en chemische methodes. Dit laat de noodzaak zien om nu toch vooral de basis van de discipline te versterken, zodat hier de pieken voor de komende 10 jaar op gebouwd kunnen worden.

## 6.5 Nationale profilering van de wiskunde

De matrix geeft de keuzes van de Nederlandse wiskunde weer. In de rijen staan de zeven focusgebieden. In de kolommen de negen wiskunde-instituten en het CWI, die elk met vier punten hebben aangegeven waarop ze in de toekomst in willen zetten. Aangezien het CWI geen versterking ontvangt uit dit sectorplan zal deze inzet vanuit eigen middelen plaatsvinden. In de laatste vier kolommen is de koppeling met de landelijke onderzoekclusters weergegeven.

Tabel 11: Profileringsmatrix van de wiskunde.

Focusgebied	Participerende universiteiten									CWI	Onderzoekclusters			
	LEI	RU	RUG	TUD	TU/e	UvA	UT	UU	VU		GQT	DIAMANT	STAR	NDNS+
Symmetrie en meetkunde	1	1	1			1		2			✓	✓		
Cryptografie en algoritmes			0,5	1		1				1	✓	✓		
Optimalisatie en onzekerheidskwantificatie			0,5		1		1			1		✓	✓	
Netwerken	1				1	1	1		1	1		✓	✓	✓
Statistisch leren	0,5	1		1	1	1	1		1	1			✓	✓
Dynamische data	0,5	1	2		1		1	2	1				✓	✓
Geometrische en stochastische evolutie	1	1		2					1		✓		✓	✓

De keuzes binnen de wiskunde worden in sterke mate bepaald door de inspanning van de faculteiten in de nationale onderzoekclusters. Door de koppeling van deze onderzoekclusters met het landelijke masteronderwijs middels MasterMath heeft de wiskunde feitelijk al de stap gezet naar de ene universiteit van Nederland.

Uit de motivatie van de faculteiten blijkt dat interessante ontwikkelingen plaatsvinden op de grensvlakken tussen onderzoekclusters onderling, of tussen onderzoekclusters en zwaartepunten binnen de informatica of de natuurkunde. Een voorbeeld hiervan is de RU, waar men door versterken van de toegepaste analyse bruggen slaat naar ontwikkelingen in de astro- en hoge energie fysica, terwijl anderzijds de basis van de wiskunde wordt versterkt op de gebieden algebra, meetkunde en topologie. Een soortgelijk voorbeeld is de UvA, waar men de raakvlakken wil versterken van de wiskunde met artificiële intelligentie en met quantum informatie, en daarnaast in wil zetten op het fundamentele onderzoek in de onderling sterk gerelateerde domeinen algebra, meetkunde en discrete wiskunde. Zo wordt enerzijds vernieuwing gevonden door aansluiting bij thema's als quantum software of *deep learning*, en anderzijds het fundament onder het nationale wiskundeonderzoek en -onderwijs versterkt.

## 7 Wisselwerking eerste en tweede geldstroom

Met de sectorplannen wil het kabinet de onderzoeksbasis in een aantal basisdisciplines in bèta en techniek versterken, via uitbreiding van de onderzoekscapaciteit en het aantrekken en behouden van (nieuw) onderzoektalent. Daarnaast richten de sectorplannen zich op een aantal overkoepelende doelen, zoals de strategische samenwerking tussen de instellingen op het gebied van onderzoek, onderwijs en maatschappelijke impact.

Zoals in paragraaf 2.5 is toegelicht, investeert het kabinet M€ 60 per jaar, waarvan tachtig procent als eerste geldstroom en twintig procent via NWO beschikbaar wordt gesteld. In dit hoofdstuk beschrijft de kwartiermaker zijn visie op de beoogde samenhang tussen de eerste en tweede geldstroom zoals deze bij de totstandkoming van de voorliggende sectorbeelden is gevormd. Daarbij wordt ingegaan op de gewenste aansluiting van de beide geldstromen en de samenwerkingsmogelijkheden tussen NWO en het veld. Onderstaand voorstel is in goed overleg met de NWO-domeinen Exacte en Natuurwetenschappen (ENW) en Toegepaste en Technische Wetenschappen (TTW) en met de betrokken bèta- en techniekdecanen tot stand gekomen.

### 7.1 Eerste geldstroom voor nieuwe posities

De sectorbeelden geven de geprioriteerde basisdisciplines binnen bèta en techniek aan. Daarbinnen wordt een geselecteerd aantal focusgebieden beschreven waarin het onderzoek in Nederland zich internationaal kan onderscheiden en waarvan versterking met het oog op de toekomstige wetenschappelijke en maatschappelijke uitdagingen nodig wordt geacht. Zoals beoogd, krijgt de Commissie Van Duyn het komend jaar de verantwoordelijkheid om de tachtig procent eerste-geldstroommiddelen toe te kennen aan voorstellen voor de gewenste versterking van facultaire zwaartepunten binnen de genoemde focusgebieden, zoals in de profileringsplannen omschreven. Het voorstel in de sectorbeelden voor bèta en techniek is om deze eerste geldstroommiddelen direct in te zetten voor het creëren van nieuwe posities in de vaste wetenschappelijke staf. Afhankelijk van de senioriteit van het gezochte talent en de benodigde middelen voor de materiële inbedding van het nieuwe staflid, gaat de kwartiermaker ervan uit dat de jaarlijks benodigde bedragen voor een nieuwe positie uiteen lopen van K€ 120 tot 250, zoals in paragraaf 2.6 nader is uitgewerkt. Langs deze weg kunnen met de eerste geldstroommiddelen naar verwachting circa 85 nieuwe posities in de techniek en circa 185 in de bèta gerealiseerd worden.

### 7.2 Tweede geldstroom voor infrastructuur en tijdelijke staf

Binnen bèta en techniek hebben de decanen aangegeven dat er, naast de invulling van nieuwe vaste wetenschappelijke posities, ook grote behoefte is aan investering in onderzoekinfrastructuur en in tijdelijke universitaire onderzoekposities (promovendi en postdocs). Met het oog op de werving van nieuw talent wordt de investering bij voorkeur zo vormgegeven dat het de aantrekkingskracht van de nieuwe posities vergroot. Men verwacht dat de spoeling voor werving dun is en dat met het buitenland geconcurrereerd moet kunnen worden door de inzet van aantrekkelijke startpakketten.

Het voorstel dat in overleg met NWO tot stand is gekomen, is om de tweede geldstroom te benutten voor investeringen in infrastructuur en tijdelijke wetenschappelijke posities in de gekozen focusgebieden van de sectorplannen, verbonden met de nieuw ingevulde sectorplanposities. OCW heeft aangegeven dat de tweede geldstroom via competitie moet worden ingezet. NWO heeft besloten daarvoor het bestaande instrumentarium binnen ENW en TTW te gebruiken. Tevens wil NWO de bestuurlijke verantwoordelijkheid voor de inzet van de middelen nemen door middel van de eigen systematiek van beoordeling en toetsing van voorstellen.

### 7.3 Een eerste investering in infrastructuur

Van de toegezegde tweede-geldstroommiddelen heeft OCW al voor 2018 een bedrag van M€ 30 aan NWO beschikbaar gesteld. Voorgesteld wordt om die middelen op korte termijn – bij voorkeur in de loop van 2019 – in te zetten voor investeringen in infrastructuur voor de geselecteerde focusgebieden binnen de sectorplandisciplines. Omdat de meeste nieuwe posities pas in de loop van de tijd ingevuld kunnen worden, wordt voorgesteld om deze middelen al in te zetten op basis van voorstellen ten behoeve van de in de sectorbeelden beschreven focusgebieden. De voorstellen kunnen uitsluitend ingediend worden door groepen van onderzoekers en hoofdaanvragers werkzaam in de zwaartepunten die volgens de sectorplannen in aanmerking komen voor versterking. Daarbij wordt het van belang geacht dat er ruimte komt voor substantiële investeringen met een maximale sectorplanbijdrage van M€ 1. Aangezien het hier investeringen betreft in de basis-onderzoekinfrastructuur, is het voorstel dat NWO bij de toekenning afziet van voorwaarden betreffende valorisatie, toepassing en industriële financiële bijdragen. Mogelijke aanvragen kunnen worden beperkt tot die facultaire zwaartepunten waaraan de Commissie Van Duijn in de zomer van 2019 nieuwe posities heeft toegekend. NWO zal de hiervoor benodigde systematiek nader uitwerken in overleg met de Commissie Van Duijn. Parallel aan de voorbereiding van de profileringsplannen wordt NWO verzocht om de beoogde systematiek en aanpak vóór 15 maart 2019 nader uit te werken en aan de Commissie voor te leggen.

Zoals in paragraaf 2.5 is omschreven is binnen deze ronde M€ 11 beschikbaar voor investeringen in de focusgebieden binnen de drie sectorplandisciplines in de techniek en M€ 19 voor de vier binnen bèta. NWO heeft aangegeven hierbij gebruik te willen maken van het bestaande instrumentarium van ENW (Open Competitie ENW-KLEIN) en TTW (Open Technologie Programma OTP). NWO zal daarbij aandacht schenken aan de wijze waarop de competitie wordt ingericht én aan de manier waarop geborgd wordt dat de beschikbare sectorplanmiddelen volledig ten goede komen aan de geselecteerde focusgebieden uit de sectorbeelden. In overleg met de Commissie Van Duijn zal NWO nader bepalen op welke wijze de hierbij betrokken selectiecommissies of jury's de voorstellen zullen beoordelen in het licht van de focus en doelen van de sectorbeelden. Hierbij kan overwogen worden om de uitgewerkte aanvragen in beginsel niet aan referenten voor te leggen, om de besluitvorming te bespoedigen. De aanvragers van alle uitgewerkte voorstellen worden uitgenodigd voor een interview door een brede beoordelingscommissie, waarbij het voornemen is om een link (personele unie) tussen de beoordelingscommissie en de Commissie Van Duijn te hanteren. De beoordelingscommissie bestaat uit voldoende personen om de interviews te kunnen uitvoeren. Deze commissie is een adequate afspiegeling van de disciplinaire samenstelling van ENW/TTW en ruimt voldoende plaats in voor deskundigen op het terrein van de gekozen focusgebieden. Daarnaast heeft het een evenwichtig verdeling man/vrouw en spreiding over universiteiten. Om een verantwoorde verdeling van de middelen over de disciplines en focusgebieden van de bèta en de techniek te bewaken, worden deze bij voorkeur als volgt gecompartmenteerd:

*Tabel 12: Compartimentering tweede geldstroom sectorplanregeling 2019 voor infrastructuur in de bèta- en techniekdisciplines.*

Discipline	2de geldstroom infrastructuur
Natuurkunde	€ 8.500.000
Scheikunde	€ 8.500.000
Informatica	€ 2.000.000
<b>Bèta totaal</b>	<b>€ 19.000.000</b>
Werktuigbouw	€ 5.500.000
Elektrotechniek	€ 3.250.000
Civiele Techniek	€ 2.250.000
<b>Techniek totaal</b>	<b>€ 11.000.000</b>

Bij de compartimentering is naar voren gekomen dat er voor de wiskunde geen en voor de informatica maar een relatief beperkte behoefte is aan investeringen in experimentele infrastructuur. Overwogen kan worden om het compartiment voor de gewenste investeringen in de informatica – gelet op de aard ervan – over te hevelen naar de NWO-regeling die voor de infrastructuur in de techniek wordt ingericht. Om het honoreringspercentage op een redelijk niveau te houden (35-50 procent) wordt voorgesteld dat de decanen samen met de Commissie Van Duijn en NWO afspreken hoe het aantal voorstellen per universiteit en per discipline te reguleren.

## **7.4 Projecten voor nieuwe onderzoekers**

Voor de periode 2020-2024 heeft OCW aan NWO jaarlijks M€ 8,6 toegezegd. In paragraaf 2.5 is geschetst dat deze middelen in de verhouding van 5,6 : 3,0 bedoeld zijn voor de geselecteerde focusgebieden van de bèta, respectievelijk de techniek. De middelen worden bij voorkeur in een doorlopende regeling of een tweetal gerichte calls ter beschikking gesteld voor tijdelijk wetenschappelijk personeel (promovendi en postdocs), aan te nemen door de nieuw benoemde onderzoekers op de 'sectorplanposities'. NWO zal in overleg met de Commissie Van Duijn en op basis van haar instrumentarium een systematiek uitwerken die voldoende competitie garandeert, ten goede komt aan de nieuwe posities vanuit het sectorplan en voldoende spreiding bewaakt over deze posities en de geprioriteerde focusgebieden. Van belang daarbij is dat de verdeling van de middelen voor de bèta (jaarlijks M€ 5,6) en techniek (jaarlijks M€ 3,0) wordt geborgd. Gezien de beperkte behoefte van de wiskunde en informatica aan versterking van de infrastructuur, moet in deze volgende rondes een groter deel ten goede komen aan deze bètadisciplines.

Een specifiek punt van aandacht is dat er voor de natuur- en scheikunde nog een bedrag van jaarlijks M€ 6,0 beschikbaar is uit het Sectorplan Natuur- en Scheikunde (SNS). Overwogen kan worden om deze middelen te betrekken bij het nieuwe sectorplan bèta, waarbij rekening gehouden moet worden met de positie van de wiskunde en informatica die significant minder infrastructuur gebruiken.

## **7.5 Versterking van het zelforganiserend vermogen**

De kwartiermaker heeft in de voorbereiding van de sectorbeelden vast kunnen stellen dat er een grote gezamenlijke wens en energie is tot het stimuleren van het zelforganiserend vermogen van de (sub)disciplines in Nederland om zo mede richting te geven aan de uitdagingen van de wetenschappelijk (sub)disciplines. Dit kan leiden tot een prachtige wisselwerking tussen het veld en NWO. De nieuwe structuur van NWO geeft prachtige kansen om in de Nexus-rol de verschillende disciplines te faciliteren in het maken van gezamenlijke afspraken en het formuleren van uitdagingen voor de toekomst.

In de sectorplannen en de financiering vanuit NWO staan het faciliteren van excellent onderzoek en het aantrekken en behouden van toptalent in Nederland centraal. Universiteiten zijn gebaat bij een zekere vorm van competitie op basis van excellentie. Daarnaast is ook aandacht nodig voor het belang van de beoogde versterking van de geprioriteerde onderzoekgebieden. Naar verwachting zullen de nieuwe posities eveneens bijdragen aan voorstellen in de brede NWO-rondes, waaronder de instrumenten die gerelateerd zijn aan de NWA en de wisselwerking met de industrie in de topsectoren. De eerste-geldstroommiddelen van de universiteiten worden structureel ingezet voor nieuwe vaste wetenschappelijke staf. Om de aanvraagdruk en honoreringspercentages op een gewenst niveau te kunnen houden is uitbreiding van de open competitie van NWO een essentieel onderdeel van deze sectorplannen. Het voorstel voor de komende zes jaar is erop gericht om de middelen van de sectorplannen in de uitgekozen gebieden te laten landen en de geselecteerde focusgebieden te versterken. Na 2024 wordt de situatie bepaald door de behaalde successen. De Commissie Van Duijn zal de resultaten beoordelen en de minister van OCW adviseren over het mogelijk indalen van de NWO-gelden.



## 8 Hoe verder naar sectorplannen

### 8.1 Van een sectorbeeld naar het sectorplan

In de sectorplanaanpak staat de integrale versterking van het wetenschappelijk onderzoek en onderwijs centraal. Het beschikbare budget komt direct ten goede aan hen die het dichtst bij het onderzoek en onderwijs staan: de (wetenschappelijke) staf van de universiteit, faculteit en vakgroep. Dit is de beste garantie voor een effectieve inzet van de beschikbare middelen. Vanaf 2018 is een significant budget beschikbaar om de onderzoeksbasis in een geselecteerd aantal disciplines te versterken. Hiermee kunnen niet alle gesignaleerde knelpunten in de volle omvang worden weggenomen, maar wordt wel de neergaande trend in de (concurrentie)positie ten opzichte van de ons omringende landen aangepakt. De versterking van de universiteiten is dan ook vooral gericht op het uitbreiden van de wetenschappelijke staf en infrastructuur in een aantal strategisch gekozen focusgebieden in de basisdisciplines binnen het bèta- en techniekdomein. Dit dient meerdere doelen tegelijk, in willekeurige volgorde: i) het verder focuseren van het onderzoek in zwaartepunten per universiteit die samen een complementair landelijk onderzoekpalet bieden; ii) het versterken van de bèta- en techniekopleidingen, iii) het schragen van de onderzoeksbasis die cruciaal is voor de interdisciplinaire uitdagingen, zoals bijvoorbeeld in de Nationale Wetenschapsagenda, iv) vernieuwing brengen in onderzoek in aansluiting op actuele wetenschappelijke en maatschappelijke uitdagingen, v) het uitbreiden van de onderzoekinfrastructuur in erkende zwaartepunten, vi) het versterken van de basis die nodig is voor het intensiveren van de publiek-private samenwerking met het bedrijfsleven en de versterking van de topsectoren, vii) het verbeteren van de genderbalans in staf en studenten, viii) het zorgen voor meer academisch geschoolde leraren voor de klas, en ix) het versterken van de koppeling tussen het nationaal onderzoeks- en onderwijspalet, et cetera. De betrokken universiteiten zullen zelf in zogeheten profileringsplannen beschrijven hoe ze middels de integrale aanpak de gewenste verbeteringen willen realiseren. Het sectorplan bèta bestaat daarmee uit dit sectorbeeld en de daarop gebaseerde profileringsplannen van de universiteiten.

Dit sectorbeeld geeft een integrale beschrijving van het onderzoek en onderwijs binnen de geprioriteerde disciplines van de deelnemende universiteiten, waarin zowel de huidige stand van zaken alsook de plannen voor de toekomst zijn opgenomen. Hierin zijn soms ook opleidingen genoemd waarvoor nog geen macrodoelmatigheidstoets heeft plaatsgevonden. Op basis van de nieuwe regeling is uitsluitel van deze toets mogelijk onder bepaalde voorwaarden. De precieze voorwaarden en werkwijze hieromtrent zullen nog door het ministerie van OCW worden vastgesteld en met de Commissie Van Duijn worden besproken.

### 8.2 Wat wordt verwacht van de universiteiten?

Op basis van de in dit sectorbeeld gemaakte keuzes zullen de hierin genoemde universiteiten uitgenodigd worden om profileringsplannen in te dienen bij de Commissie Sectorplan Bèta en Techniek met Hans van Duijn als beoogd voorzitter. Deze plannen beschrijven de beoogde profilering van de in dit sectorbeeld geprioriteerde disciplines en faculteiten. Bij het opstellen van de profileringsplannen zal er namens elke universiteit één decaan optreden als penvoerder voor het universitaire profileringsplan bèta. Deze zal daarmee ook het aanspreekpunt zijn voor de Commissie Van Duijn betreffende alle inspanningen in de bètadisciplines van die universiteit. De penvoerder zal in het profileringsplan beschrijven hoe en welke van de aangegeven ambities de universiteit nastreeft en wat nodig is om deze te realiseren. Het plan is één geïntegreerd stuk met daarin de gezamenlijke plannen voor die disciplines in het bètadomein die voor versterking in aanmerking kunnen komen, gericht op de versterking van de in hoofdstuk 4 beschreven focusgebieden. De profileringsplannen worden door de Commissie Van Duijn geëvalueerd en beoordeeld, en waar de Commissie dit nodig acht tussentijds teruggedragen bij de faculteiten met een verzoek om opheldering. Na 15 mei zal de Commissie de definitieve profileringsplannen prioriteren, en een daaruit voortvloeiend voorstel tot verdeling van middelen voorleggen aan het ministerie van OCW. De minister zal op basis van dit advies besluiten hoe de middelen voor de periode 2019-2024 worden verdeeld, met de uitdrukkelijke intentie om deze na die periode structureel te laten indalen.

De plannen en ambities van de verschillende disciplines zullen een cruciale rol in het beoordelingsproces spelen. Dat wil zeggen dat landelijk afgestemde afspraken over zwaartepuntvorming (ter herinnering: faculteiten kennen zwaartepunten en disciplines kennen focusgebieden) zoals beschreven in hoofdstuk 4 en 6 leidend worden bij het toekennen van de posities. In de prioritering zal de Commissie verder rekening houden met de kwaliteit van het voorstel en de daarin uitgesproken ambities, evenals de kracht van de indienende faculteit (zijnde een combinatie van grootte en kwaliteit van het facultaire zwaartepunt). Ten slotte kunnen uitdagende ambities alleen met bewezen kracht worden gerealiseerd. Hoewel de in dit sectorbeeld vastgestelde bedragen per discipline niet onderhandelbaar zijn, doet dit sectorbeeld geen uitspraken over de marges van de te verkrijgen structurele gelden per zwaartepunt in elke discipline voor een faculteit. Dit is geheel aan de Commissie Van Duijn. Het is echter mogelijk om een reële schatting te maken van de slagingskansen van de zwaartepunten zoals opgevoerd door de faculteit in het profileringsplan. Hierdoor kan wat in de sectorplannen wordt voorgesteld ter versterking van een discipline in een individuele faculteit gelijke tred houden met wat er per discipline en faculteit gemiddeld te verdelen valt. Na toekenning door de minister van OCW zal de Commissie Van Duijn het verloop van het proces monitoren. Bij het succesvol realiseren van de - door de faculteiten zelf gestelde - ambities in de zesjarige looptijd van het sectorplan, zullen de daarin beschikbaar gestelde middelen op structurele wijze indalen in de eerste geldstroom van de universiteiten. Voor de planning met specifieke data wordt verwezen naar tabel 13.

*Tabel 13: Tijdsplanning vanaf 1 december.*

1 december – 25 januari	Goedkeuringsproces van de sectorbeelden bij het ministerie OCW
15 maart	Faculteiten leveren hun profileringsplannen in bij de commissie Van Duijn
15 april	Terugkoppeling naar faculteiten door commissie
15 mei	Faculteiten leveren de definitieve plannen in
Medio juni	Commissie van Duijn adviseert minister OCW
1 juli	Minister neemt een beslissing

### 8.3 Richtlijnen voor een universitair profileringsplan

In nauw overleg met de Commissie van Duijn zijn hier de richtlijnen van de in te dienen profileringsplannen omschreven, met een nadere detaillering, uitleg en motivatie van de in hoofdstuk 6 (en bijlage A) beschreven activiteiten en ambities van de faculteiten in elke discipline. Waar de beschrijving in bijlage A gelimiteerd was tot 1500 woorden per instelling, zal er significant meer ruimte beschikbaar komen in de profileringsplannen. De Commissie van Duijn zal daar, zo spoedig mogelijk na vaststelling van dit sectorbeeld, specifieke richtlijnen voor geven aan de decanen. In de profileringsplannen kan de huidige positie en de ambities op het gebied van onderzoek, onderwijs en maatschappelijke betrokkenheid op uitgebreide wijze beschreven worden. Hierbij wordt rekening gehouden met de doelen en randvoorwaarden zoals gesteld in dit sectorbeeld. De hoofdpunten daarvan worden hieronder benoemd. Van de instellingen wordt verwacht dat ze de volgende onderwerpen adresseren in de in te dienen profileringsplannen:

*A – Een korte en bondige beschrijving over de universiteit en de samenhang binnen en buiten de faculteiten in het bètadomein (de preambule):*

- Een beschrijving van de strategie van de universiteit en de faculteiten met betrekking tot hun unieke positie.
- De profilering van de universiteit (en faculteiten) op het gebied van onderwijs en onderzoek.
- Een beschrijving van de ambities en doelen van de universiteit in de onderhavige sectoren, dit in samenhang met de facultaire doelen, centrale stimuleringen, en met de landelijke en internationale samenwerkingen op universitair niveau.

*B – Beschrijving van de onderzoekswaartepunten en informatie over de gevraagde versterkingen:*

- De penvoerders worden gevraagd om op heldere wijze voor elke discipline afzonderlijk de lokale waartepunten (3-4) gekoppeld aan de landelijke focusgebieden te benoemen en te correleren aan de landelijke afspraken, zoals weergegeven in hoofdstuk 4 en 6.
- Alle waartepunten worden in detail beschreven inclusief de huidige bezetting (inclusief de namen van zittende staf – als dit volgens de privacywet niet mag, zal een andere oplossing gekozen moeten worden om een goed beeld te krijgen van de huidige bezetting) en de ambities voor de periode 2019-2024, alsook de onderbouwing van de kwaliteit en een heldere link naar het onderwijs. Dit wordt gevraagd voor alle waartepunten, ook daar waar in de profileringsplannen geen versterking wordt aangevraagd. Met andere woorden: voor alle onderhavige disciplines komt een staalkaart van Nederland van alle (herkenbare) waartepunten beschikbaar, zodat duidelijk is wie waar actief betrokken is bij welke focusgebieden.
- Voor de waartepunten per faculteit wordt gevraagd de verbinding te beschrijven met de bestaande bachelor opleiding (CROHO-label) en masteropleiding(en) en/of mastertracks. Zoals ook in de vorige sectorplannen is de inhoudelijke relatie tussen een facultair waartepunt en de bijbehorende master (of mastertrack) een essentieel onderdeel van het borgen van de kwaliteit van onderwijs en de verwevenheid tussen onderzoek en onderwijs.
- De gevraagde posities zijn gekoppeld aan een facultair waartepunt en passen binnen de focusgebieden van de discipline zoals beschreven in hoofdstuk 4 en 6. Dit wordt in het plan duidelijk gemaakt door voor elke aangevraagde positie een korte beschrijving van het voorziene werkterrein op te nemen, in relatie tot het beoogde focusgebied en daarin te versterken waartepunt.
- Voor de waartepunten per faculteit wordt aangegeven wat de betekenis is van het waartepunt en de verwoorde ambities voor de relevante NWA routes of kennisagenda's van de topsectoren.
- Bij elke positie wordt aangegeven of het hier gaat om een senior of *tenure track* positie en of het een positie betreft die voornamelijk experimenteel of theoretisch van aard is. Daarbij worden de tarieven zoals beschreven in 2.6 aangehouden.
- In beperkte mate is er de mogelijkheid om een investering in dure apparatuur c.q. infrastructuur te doen met een afschrijvingsperiode van zes jaar. Ook technische ondersteunende staf kan beperkt worden opgevoerd tegen een tarief van k€ 75 per jaar. Het is aan de Commissie van Duijn om te bezien of dit in 2024 wordt gezien als een strategische investering, die financieel kan indalen. Bij deze investering wordt eenzelfde beschrijving gemaakt als gevraagd bij de vaste wetenschappelijke posities ten aanzien van de koppeling met waartepunt en focusgebied.
- Er is de mogelijkheid om per universiteit één positie te reserveren voor een nieuw vrouwelijk staflid zonder dat deze op voorhand wordt gekoppeld aan een specifiek waartepunt. Echter bij de benoeming moet het wel aannemelijk te maken zijn dat deze passend is in de focussering en de landelijke afspraken.
- Het wordt sterk aangeraden om bij meerdere aangevraagde posities in één waartepunt een prioritering aan te geven.
- In gezamenlijk overleg kunnen de decanen besluiten om een (klein) deel van de middelen voor de verschillende disciplines te reserveren voor landelijke acties voor *outreach* en lerarenopleidingen, in plaats van deze doelen elk in de separate plannen op te nemen. Als de decanen hiertoe besluiten wordt hen gevraagd een gezamenlijk plan van aanpak inclusief een passende begroting op te stellen. Dit plan zal eenzelfde procedure ondergaan als de plannen per universiteit, dat wil zeggen: 15 maart een eerste en 15 mei een definitieve versie voorleggen aan de Commissie Van Duijn.

*C – De toetsbare ingrediënten – inclusief SMART criteria – voor de integrale versterking van het onderzoek, onderwijs en andere aspecten die gerealiseerd gaan worden door bovenstaande investeringen:*

- Een getalsmatige samenstelling van het aantal studenten (bachelor, master en promovendus) per discipline wordt gevraagd voor zowel de laatste drie jaar als een voorgestelde situatie in 2024. Nadrukkelijk moet helder zijn hoe deze doelstellingen te halen zijn, inclusief SMART criteria voor halverwege het proces. Het lijkt goed om in samenspraak tussen de Commissie van Duijn en het

decanenoverleg hier een tabel/template voor te maken en een opzet voor hoe de kengetallen aangeleverd moeten worden.

- Een overzicht van het aantal vrouwelijke studenten en stafleden dat de discipline momenteel kent en de doelstellingen voor 2024.
- Een beschrijving van de studierendementen van de bachelor- en masteropleidingen in de zwaartepunten evenals het promotierendement en de doorlooptijd daarvan, en een voorgestelde situatie in 2024.
- Een beschrijving hoe de investering in de faculteit kan leiden tot het aanpassen van bestaande of toekomstige numeri fixi.
- De specifieke maatregelen voor het verhogen van het aantal academisch geschoolde leraren voor de klas in het voortgezet onderwijs, inclusief streefgetallen per universiteit. Hierbij kan ook worden verwezen naar een door de bètadecanen gezamenlijk geformuleerd plan.
- De specifieke maatregelen voor *outreach* naar het primair en voortgezet onderwijs om de aantrekkingskracht van studenten in de bètadisciplines structureel hoog te houden. Ook hierbij mag worden verwezen naar een door de bètadecanen gezamenlijk geformuleerd plan.
- De verwevenheid tussen onderzoek en onderwijs is groot in de academische activiteiten. Met bovenstaande relatie tussen zwaartepunt en bachelor- en masteropleidingen kan ook helder worden gemaakt hoe de huidige sectorale investeringen worden ondersteund door inzet vanuit de twee procent profileringsmiddelen en de middelen uit het Sectorakkoord wetenschappelijk onderwijs 2018; en hoe *vice versa* de geformuleerde profileringsplannen bijdragen aan de kwaliteitsafspraken op het gebied van onderwijs. Zie voor meer info: <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/convenanten/2018/04/09/sectorakkoord-wetenschappelijk-onderwijs-2018>.

Met bovenstaande richtlijnen als uitgangspunt zal de Commissie Van Duijn in samenspraak met het decanenoverleg de gespecificeerde SMART criteria vaststellen en ook de omvang en manier van rapporteren. De individuele faculteiten zullen zelf hun ambities vaststellen en vermelden in hun profileringsplannen van 15 maart. Deze worden voorgelegd aan de Commissie Van Duijn en door de Commissie voorzien van commentaar voor de definitieve profileringsplannen van 15 mei.

## 9 Conclusie

Na de voorgaande hoofdstukken volledig te hebben afgestemd met alle betrokkenen, wil ik als kwartiermaker dit hoofdstuk aangrijpen om de sectorbeelden met een meer persoonlijke noot te beëindigen. Daarbij verwijs ik graag naar de inleiding, waar gesproken wordt over een enthousiaste start. Deze sectorbeelden reflecteren namelijk precies dat: het enthousiaste begin van een proces wat de Nederlandse universiteiten vergaand kan versterken. Naast het feit dat de sectorbeelden de basis vormen voor de broodnodige investering in de bèta en technieksectoren, is het opstellen hiervan vooral een eerste stap in een proces van verdere zelforganisatie van deze sectoren. Een *bottom-up* gedreven aanpak, waarin zelforganisatie plaatsvindt langs de lijn van de disciplines, waarin de universiteiten zijn onderverdeeld, en waarbinnen het onderwijs, onderzoek en werken aan maatschappelijke doelstellingen plaatsvindt. Ik ben er dan ook van overtuigd dat dit grotere doel scherp in het vizier gehouden wordt en dat de verworven middelen worden besteed met dat doel in gedachten; een versterkte basis. Alleen op deze manier kan de zelforganisatie van de Nederlandse wetenschapsgebieden maximaal worden vergroot, het vertrouwen in en de autonomie van de wetenschap en de wetenschappers ten volle worden versterkt. Uiteindelijk zal dat de Nederlandse wetenschap optimaal positioneren in een wereld, waar internationaal steeds meer wordt geïnvesteerd in de natuur- en technische wetenschappen. Hieronder zal ik kort op deze aspecten ingaan.

### 9.1 Sectorplannen als investeringsmechanisme

De ambities op gebied van onderzoek, onderwijs en bijdragen aan maatschappelijke uitdagingen zijn hoog. Echter, de onderzoeksinspanning van Nederland in de hier beschreven disciplines is teruggelopen tot onder de mondiale norm en is nog verder onder druk komen te staan door de toegenomen student-stafratio en de vraag naar goed opgeleide bètatechnici vanuit de maatschappij. Voor de informatica en de werktuigbouwkunde is de vraag momenteel zelfs zo sterk dat universiteiten amper kunnen concurreren met de industrie en dus grote moeite hebben om hun wetenschappelijke staf aan te trekken c.q. te behouden. Gezien de achterstand en de omvang van de problematiek zullen de beschikbare middelen niet voldoende zijn om al de beschreven ambities ten volle waar te maken. Als deze middelen echter worden ingezet vanuit het gedachtegoed van de integrale aanpak van onderzoek, onderwijs en bijdragen aan maatschappelijk doelen, zal dit maximaal effect hebben op indicatoren zoals de onderzoekspecialisatie index, (citatie) impact van het onderzoek en de student-stafratio, en ook op de minder SMART te formuleren doelen als autonomie en zelforganisatie van de discipline.

Het is belangrijk bij deze integrale aanpak ook de gehele keten van primair en voortgezet onderwijs, verbinding met hbo en academische scholing van bachelor tot *tenure track* voor ogen te houden. Hiervoor zal moeten worden ingezet op *outreach* en versterken van lerarenopleidingen, maar kan ook gekeken worden naar de internationale wervingskracht op alle niveaus. Als voorbeeld hiervan is in nauwe samenwerking met Studyportals Eindhoven een analyse gemaakt van de aantrekkelijkheid van de Nederlandse universiteiten voor buitenlandse studenten. Daaruit blijkt dat studenten uit de internationale topuniversiteiten (de top 100) maar beperkt geïnteresseerd zijn om in Nederland verder te studeren in de bèta en techniek. Het is dan ook zeer aan te raden om de staalkaart van de Nederlandse natuur- en technische wetenschappen zoals verenigd in de zwaartepunten en verbonden met de masteropleidingen in te zetten om toekomstige studenten en promovendi aan te trekken.

Over de volle linie geldt dat de doelen zoals beoogd in de integrale aanpak voornamelijk gerealiseerd zullen moeten worden door het creëren van nieuwe stafposities. Met de beschikbare middelen zal een significante versterking van de universitaire wetenschappelijke staf in het bèta en techniek domein worden bereikt. Dit geeft een geweldige kans voor de vele uitmuntende jonge wetenschappers die recent zijn gepromoveerd en momenteel als postdoc in het buitenland of op de Nederlandse universiteiten werkzaam zijn. Het is dan ook mijn hoop dat de faculteiten vertrouwen geven aan deze jonge wetenschappers, die dankzij de sectorplannen met mooie startpakketten kunnen beginnen. *Tenure track* onderzoekers moeten reeds zoveel tegelijk realiseren in een korte tijd – waarin ze ook vaak nog een familie stichten – dat een onvoorwaardelijke steun aan de nieuwe stafleden meer dan gerechtvaardigd is.

## 9.2 Sectorplannen als middel om de sectoren te organiseren

Bij het opstellen van deze sectorbeelden is eens te meer gebleken hoe de domeinen bèta en techniek enerzijds hetzelfde nastreven (het geven van goed onderwijs, doen van hoge kwaliteit onderzoek en hebben van impact in maatschappelijke uitdagingen) en anderzijds verschillen in aanpak (het verleggen van de grenzen van het weten dan wel van het kunnen). Deze verschillen in aanpak vullen elkaar aan en stellen de domeinen in staat om gezamenlijk de belangrijkste uitdagingen van de maatschappij tot een succesvol resultaat te brengen. Dit komt tot uitdrukking in interdisciplinaire projecten en programma's waar wetenschappers en technologen elkaar aanvullen en inspireren. Deze wisselwerking wordt straks gevoed door een versterkte basis, van waaruit de disciplines de grenzen van het weten en het kunnen verleggen. Dit geheel wordt gecomplementeerd door het goed opleiden van jonge mensen en hen toerusten met kennis en kunde die zeer gewenst is in de Nederlandse (maak)industrie en maatschappij.

Om bij dit alles de juiste balans tussen complementariteit en gezamenlijkheid te bereiken zullen de decanen in goed overleg en op basis van deze sectorbeelden hun profileringsplannen opstellen. De Commissie Van Duijn zal op de implementatie en uitvoering hiervan toezien, waarbij het bèta-decanenoverleg en het nieuw gestarte techniekdecanenoverleg als primair aanspreekpunt dienen voor de landelijke afspraken, en de leden hierin elk individueel aanspreekpunt zijn voor de lokale uitvoering van de gemaakte afspraken. Daarnaast is een belangrijke rol weggelegd voor de nationale disciplinaire overlegorganen, zoals het Platform Wiskunde Nederland en het Informatica Platform Nederland. Het is dan ook goed om te zien dat andere disciplines, zoals de werktuigbouwkunde en de elektrotechniek, in het kader van deze sectorbeelden hebben uitgesproken een vergelijkbaar platform te willen starten. Dergelijke platforms zijn essentiële instrumenten voor de landelijke afspraken over onderzoek en onderwijs en zullen als zodanig hun functie verder versterken tijdens de looptijd van de komende sectorplannen. In combinatie met de ambitie die NWO voor zichzelf geformuleerd heeft als Nexus kan een prachtige synergie ontstaan tussen de eerste en tweede geldstroom. Een mooie eerste stap hierin is het koppelen van de nationale disciplineplatforms aan strategische discussies binnen NWO.

Gegeven de inzet en het enthousiasme vanuit alle geledingen voor deze sectorbeelden heb ik dan ook het volste vertrouwen dat er met de komende sectorplannen flink geoogst kan worden. Ik voorzie daarbij een verdere toenadering van de natuurwetenschappen (bèta) en technische wetenschappen, waarbij de verschillen de komende decennia zullen marginaliseren. De noodzaak van de technologische benadering zal nog belangrijker worden voor de puur fundamentele natuurwetenschapper, terwijl anderzijds de uitdagingen in de technologie om een steeds fundamenteeler aanpak zullen vragen. Deze verwevenheid is nu al te zien in de informatica, waar de kerninformatica niet zonder de toepassingen kan en de toegepaste informatica geen echte vooruitgang zal boeken zonder de nieuwe inzichten uit de kerninformatica. Maar ook bij de quantumcomputer en de geïntegreerde fotonica lopen de verschillende disciplines naadloos in elkaar over. Het is mijn hoop en verwachting dat ook in de andere disciplines deze toenadering steeds meer zal plaatsvinden, waardoor Nederland straks een internationaal sterke en geïntegreerde "*science en engineering*" positie kan innemen. Op deze wijze zullen de centrale vraagstukken in de NWA en de topsectoren een nog beter basis voor interdisciplinair onderzoek verkrijgen. Hierbij zal de zelforganisatie zoals ingezet in de komende sectorplannen de disciplines optimaal in staat stellen om assertief te reageren op ontwikkelingen binnen en buiten de eigen discipline, om zo vanuit de basis de slagkracht van de faculteiten en universiteiten te vergroten en de Nederlandse wetenschap tot grotere hoogten te brengen.

## Bijlage A: Universiteitsbeelden

De participerende universiteiten zijn allen gevraagd om een korte schets aan te leveren van de huidige organisatie en van het landschap waarin zij opereren, alsook van relevante veranderingen in dat landschap. Op basis daarvan heeft elke faculteit vervolgens beschreven waarom ze op welke focusgebieden (zoals gedefinieerd in hoofdstuk 4) willen inzetten voor de toekomst. Deze beschrijvingen per universiteit zijn hieronder opgenomen.

### A.1. Universiteit Leiden

Het onderzoek aan de Faculteit der Wiskunde en Natuurwetenschappen (FNW) van de Universiteit Leiden vindt plaats binnen twee van de vijf universitaire hoofdthema's: 'Fundamentals of Science' en 'Bioscience, the Science Base of Health and the Environment'. De faculteit bestaat uit acht disciplinaire onderzoeksinstituten: wiskunde (MI), informatica (LIACS), astronomie (Sterrewacht), natuurkunde (LION), scheikunde (LIC), biofarmaceutische wetenschappen (LACDR), biologie (IBL) en milieuwetenschappen (CML). Daarnaast herbergt FWNI het Lorentz Center en de Hortus Botanicus. Leidse wetenschappers spelen een prominente rol in de Zwaartekrachtprogramma's Nanofront, MaSc, ICI, QSC en Networks, en werken nauw samen met AMOLF, ASTRON, CWI, Nikhef, NIOO en SRON. De faculteit werkt duurzaam samen met Leiden-Delft-Erasmus (LDE) partners in onder andere drie gezamenlijke onderzoekscentra en drie gezamenlijke opleidingen. Ook met het LUMC zijn er sterke banden met twee gezamenlijke opleidingen en intensieve onderzoekssamenwerkingen over de gehele breedte van de bètawetenschappen. De hoge concentratie van kennisintensieve partners op het Leiden BioScience Park (LBSP) is uniek en zal sterk toenemen door facultaire en gemeentelijke initiatieven en de verhuizing van SRON naar Leiden. De faculteit zal met het LUMC en gesteund door de komst van de EMA (Amsterdam) een sterk geneesmiddelenonderzoekcentrum vormen. FWNI is leidend in een nieuw onderzoeksprogramma op het gebied van AI/data science waarbinnen samengewerkt wordt met alle Leidse zusterfaculteiten. Verder zijn er sterke banden met het Naturalis Biodiversity Center en nabijgelegen toonaangevende wetenschapsmusea. De lokale omgeving garandeert een goed vestigings- en werkklimaat voor ontplooiing van (inter)nationale toponderzoek(st)ers. Het Leidse natuurwetenschappelijke onderzoek is nieuwsgierigheidgedreven. De gegenereerde fundamentele kennis leidt tot toepassingen, draagt bij aan innovatie, en sluit aan bij maatschappelijke vragen (NWA, Topsectoren). De wetenschappelijke statuur van facultaire onderzoekers blijkt uit de vele persoonlijke subsidies, prijzen en actieve participatie in grote onderzoekconsortia. Onderzoek en onderwijs worden dankzij de reikwijdte van de instituten en het grote aantal raakvlakken, via interdisciplinaire lijnen verdiept. UL/FWNI is actief lid van de LERU die zich inzet voor het borgen van academische waarden in nationale en Europese beleidsagenda's. In 2023 zal bijna de gehele faculteit in één nieuw gebouw gehuisvest zijn. Nu al is een groot deel van de wetenschappelijke infrastructuur bijeengebracht, zoals het Netherlands Centre for Electron Nanoscopy (NeCEN), Cell Observatory, Metabolomics laboratorium, NMR-faciliteiten en laboratoria voor ruimte-instrumentatie. FWN huisvest een sterke elektronische afdeling en een unieke fijnmechanische dienst, waarvan de medewerkers op de Leidse bètacampus bij de Leiden Instrumentmakers School (LIS) worden opgeleid. Onderzoekers van FWNI ontmoeten elkaar wekelijks tijdens de 'This Week's Discoveries' lunchbijeenkomst en de buitenwereld in het Lorentz Center (80 workshops per jaar).

#### A.1.1 Toekomstvisie van de Universiteit Leiden voor de informatica

Het Leiden Institute of Advanced Computer Science (LIACS) staat internationaal bekend om zijn hoogwaardige onderzoek in de kerninformatica (onderzoekvisitie 2016: 2-1-2; 48 NWO thematische programma's voor onderzoek aan onder andere algoritmiëk en genetwerkte computersystemen; 4 VENI/VIDI/VICI in de laatste tien jaar) en richt zich vanuit deze basis ook op AI en data science. De kracht van het LIACS zit in Combinatoriek, Optimalisatie, en Correctheid aan de ene kant, en Computer Vision, Embedded en High Performance Computing aan de andere kant. De sterktes van het LIACS komen onder andere aan het licht in het Zwaartekrachtprogramma QSC, waarbinnen nauw samengewerkt wordt met de wiskunde en de natuurkunde. Binnen het AI-onderzoek worden investeringen voorzien op het gebied van beeldverwerking, *machine Learning*, patroonherkenning, redeneren, en mensmachine



interactie. Met scheikunde, biologie, biofarmaceutische wetenschappen en wiskunde heeft het LIACS het Center for Computational Life Science opgezet, waarin (ook in samenwerking met het LUMC) onder andere onderzoek gedaan wordt naar computationele chemie en beeldverwerking waarbinnen kansen voor versterking liggen. LIACS is trekker (met wiskunde) van het universiteitbrede Data Science onderzoeksprogramma, waarin jonge onderzoekers op nieuwe manieren datagedreven onderzoek doen in de traditionele sterktes van Leiden (Fundamentals of Science, Bioscience, maar ook Rechten, Taalwetenschappen). In Leiden wordt de thematiek van de VSNU agenda Digitale Samenleving hiermee daadwerkelijk uitgevoerd, door de eigen instituten. Ter versterking van de kerninformatica worden ook investeringen voorzien in de algoritmiek en computer systems. Het LIACS werkt samen met o.a. Tata Steel, BMW, KLM, NOC/NSF en de KNVB. Het LIACS verzorgt bachelor/ en masteronderwijs in informatica, *artificial intelligence*, *data science*, bioinformatica, en informatica en economie. De studentenaantallen zijn vergeleken met vijf jaar geleden fors toegenomen, een trend die nog verder zal doorzetten. De uitdaging is om de populaire Leidse informatica opleidingen qua karakter en intensiteit op niveau te houden en te versterken.

#### **A.1.2 Toekomstvisie van de Universiteit Leiden voor de natuurkunde**

Het Leiden Instituut voor Onderzoek in de Natuurkunde (LION) heeft een internationaal hoog aangeschreven track record in fundamenteel fysisch onderzoek (onderzoekvisitatie 2016: 1-1-2; 4 actieve KNAW leden; 4 Spinoza, 2 ERC StG, 3 AdG, 1 SyG, 17 VENI/VIDI/VICI in de laatste tien jaar). Het LION onderscheidt zich door een nauwe interactie tussen theorie en experiment en ontwikkeling van bijzondere instrumentatie. Sterktes liggen bij de kosmologie, bij theoretisch onderzoek aan Majorana fermions, quantum computing en quantum matter en in experimenteel onderzoek op het gebied van supergeleiding, quantumcoherentie fenomenen, *soft active matter*, single molecule spectroscopie en fysische processen in levende cellen. Instrumenteel hierbij is de deelname aan drie Zwaartekrachtprogramma's: Nanofront (samen met TUD, op het gebied van quantumnanoscience en bionanoscience); Matter at all Scales (binnen het Amsterdam/Leiden/Utrecht Delta Institute for Theoretical Physics); en het Quantum Software Consortium (met TUD, UvA en VU). Hierop voortbouwend wil het LION inzetten op gebieden waar de eigen sterktes gecombineerd worden met sterke samenwerkingen. De synergie tussen de natuurkunde en de astronomie (behorend tot de absolute wereldtop) op het gebied van de kosmologie zal verder worden versterkt door de komst van SRON naar Leiden en Delft, en kan vruchtbaar uitbouwen op het gebied van 'multi-messenger' data analyses (licht, neutrino's, zwaartekrachtgolven). Soft active matter betreft een jonge maar actieve groep met landelijke samenwerkingen, die door de juiste versterking internationaal leidend kan worden. In het quantum domein zoekt LION consolidatie op het gebied van gecorreleerde elektronsystemen en versterking op het gebied van topologische materialen en blijft de sterke samenwerking met Delft gehandhaafd. Binnen het bioscience thema gaat het onderzoek aan de fysica van cellen sterker verknoopt worden met het chemische biologieonderzoek bij de scheikunde, biofarmaceutische wetenschappen en biologie. Op alle genoemde gebieden is het van belang dat versterking in het onderzoek ook een wezenlijk sterker en hoogwaardiger onderwijs meebrengt. In dat onderwijs wil LION ook naar accentverschuiving streven, met meer nadruk op begrip voor instrumentatieontwikkeling en de directe behoeftes van nieuwe technologieën.

#### **A.1.3 Toekomstvisie van de Universiteit Leiden voor de scheikunde**

Het Leiden Instituut voor Chemie (LIC) doet op hoog niveau nieuwsgierigheidgedreven onderzoek binnen de zwaartepunten 'Energie & Duurzaamheid' (E&S) en 'Chemische Biologie' (CB) (onderzoekvisitatie 2017: 1-1½-2; 2 actieve KNAW leden; 8 ERC StG/CoG/AdG, 19 VENI, 13 VIDI, 5 VICI, 11 NWO TOP-TOPPUNT in de laatste tien jaar). Het E&S cluster bestudeert chemische reacties die cruciaal zijn voor de energie- en chemietransitie, zoals watersplitsing en CO<sub>2</sub> reductie. Leiden loopt wereldwijd voorop in de elektrokatalyse, de computationele chemie van reactiviteit aan goed-gedefinieerde oppervlakken onder elektrochemische en gasfasecondities, en het atomair afbeelden van interacties en reacties aan katalysatoroppervlakken, gebaseerd op geavanceerde theoretische en spectroscopische technieken. E&S-onderzoekers werken samen met de Leidse fysica op theorievorming en het ontwerpen van unieke apparatuur, en hun werk vindt gretig aftrek bij de chemische industrie (Hitachi, Shell, BASF). Het E&S-cluster voorziet investeringen in biofysische chemie (leren van natuurlijke foton- en elektron overdrachtsprocessen), in moleculaire

spectroscopie (inzicht in chemie op het grensvlak van elektrodes en elektrolyten) en in fysische chemie (elektrochemische synthese van hernieuwbare bouwstenen). Het Leidse CB-onderzoek is voortgekomen uit de lange traditie van bio-organische chemie aan biopolymeren en staat centraal in het Zwaartekrachtprogramma 'Institute of Chemical Immunology'. Het loopt internationaal voorop in chemische proteomics in relatie tot geneesmiddelenonderzoek. CB-onderzoekers werken samen met (inter)nationale bedrijven (Roche, Sanofi, Pfizer, Merck, Dow-Dupont) en biotech start-ups (Azafaros). Het CB-cluster voorziet investeringen in samenspraak met de biologie, de biofarmaceutische wetenschappen en de informatica in de computationele chemie en structuurbiologie/kristallografie (inzicht in de werking van kandidaat-geneesmiddelen), en in (bio)organische, medicinale en fysiologische chemie (hoe gedragen kandidaat-geneesmiddelen zich in een organisme). Het LIC verzorgt bacheloronderwijs in Molecular Sciences and Technology en Life Sciences and Technology (MST/LST, met TUD), masteronderwijs in Chemistry en LST en draagt sterk bij aan het onderwijs in biofarmaceutische wetenschappen. De uitdaging is om de populaire Leidse en Leids-Delftse scheikunde opleidingen qua karakter en intensiteit op niveau te houden en te versterken.

#### **A.1.4 Toekomstvisie van de Universiteit Leiden voor de wiskunde**

Het Mathematisch Instituut (MI) zet in op het herijken van de twee excellente onderzoeksprojecten AGN en A&S (onderzoekvisitatie 2016: beiden 1-1-1; 7 actieve KNAW leden; 1 Spinoza, 3 ERC AdG, 3 VICI, 2 VIDI, 6 VENI in de laatste tien jaar). AGN (Algebra, Geometry, Number theory) voorziet versterking in de theoretische en algoritmische meetkunde en getaltheorie, waarvan de integratie een typerende Leidse invalshoek is. AGN heeft toepassingen in de cryptografie (klassiek en post-quantum) en beeldanalyse, en sluit aan bij de clusters DIAMANT en GQT en het landelijke thema Symmetrie en Meetkunde. Het AGN-onderzoek is verbonden aan het Zwaartekrachtprogramma QSC (met LION en LIACS) en het internationale netwerk Algant. A&S (Analyse en Stochastiek) zet in op dynamische en stochastische systemen en data science, aansluitend bij de clusters NDNS+ en STAR en de landelijke thema's Geometrische en Stochastische Evolutie, Netwerken en Statistisch Leren. Het onderzoek in Leiden onderscheidt zich door bestudering van de structuur en functionaliteit van netwerken en evolutie in tijd en ruimte vanuit een combinatie van modellen (stochastisch/agent-based/pde/hidden, discreet/continu/hoog-dimensionaal) en data-gerichte leermethoden. Toepassingen worden gevonden door samenwerkingen met de biologie, natuurkunde, en biofarmaceutische wetenschappen, maar ook met de aard- en milieuwetenschappen en geneeskunde/epidemiologie (Data Science Onderzoeksprogramma, LUISS, LCN2, Cell Observatory). Het A&S-onderzoek is verbonden aan het Zwaartekrachtprogramma Networks en ontwikkelt in samenwerking met IBM-SPSS methodes voor de analyse van hoogdimensionale systemen. Het MI verzorgt wiskunde- en statistiekonderwijs op alle niveaus. Het heeft een bachelor en master wiskunde, maar ook een (unieke) master statistical science/data science, en werkt aan het opzetten van een bachelor *data science*, in samenwerking met het LIACS. Belangrijke uitdagingen zijn het handhaven van de bewezen kwaliteit van de persoonsgerichte begeleiding van studenten, gegeven de verveeelvoudigde instroom, en de aanzienlijk toegenomen portefeuille van wiskundeonderwijs aan andere opleidingen en het Leiden University College.

## **A.2. Radboud Universiteit Nijmegen**

Het onderzoek van de Faculteit der Natuurwetenschappen, Wiskunde en Informatica (FNWI) van de Radboud Universiteit (RU) in Nijmegen is niet disciplinair maar thematisch georganiseerd. Het onderzoek is ondergebracht in zeven onderzoeksinstituten: Institute for Computing and Information Sciences (ICIS), Institute for Mathematics, Astrophysics and Particle Physics (IMAPP), Institute for Molecules and Materials (IMM), Institute for Science in Society (ISiS), Institute for Water and Wetland Research (IWWR) en twee campusbrede instituten: Radboud Institute for Molecular Life Science (RIMLS) en het Donders Centre for Neuroscience (DCN). De bachelor- en masteropleidingen zijn Wiskunde, Natuur- en Sterrenkunde, Scheikunde, (Medische) Biologie, Informatica, Moleculaire levenswetenschappen en de interdisciplinaire opleiding Science. FNWI heeft een aanbod van negen masteropleidingen met interdisciplinaire specialisaties. Het totaal aantal studenten is de afgelopen jaren aanzienlijk gegroeid, met een opvallend sterke toename van het aantal informaticastudenten. FNWI beschikt over een aantal unieke

onderzoeksfaciliteiten, waaronder de recent verbouwde en geïntegreerde faciliteit HFML-FELIX, gesteund door NWO BIG en drie nationale roadmaps, met de unieke combinatie van een hoog veld magnetenlab (tot 45 Tesla) en vrije-elektronenlasers voor infrarood en terahertz experimenten. De hoge onderzoekskwaliteit binnen de FNWI wordt gestaafd door toekenningen in de afgelopen tien jaar van 6 Spinozaprijzen, 17 ERC-AdvG en Zwaartekracht-programma's (Building a Synthetic Cell en Research Centre for Functional Molecular Systems) en een cruciale bijdrage aan de Nobelprijs voor grafeen. Een overkoepelend speerpunt is de ontwikkeling en toepassing van geavanceerde data science en AI. Binnen de campus in Nijmegen wordt door FNWI intensief samengewerkt met andere faculteiten en het Radboudumc, vaak via grote publiek-private samenwerkingen, onder andere op het gebied van data security, *citizen science*, immunologie, metabolomics, neurowetenschappen en nano science. Het percentage vrouwelijke vaste stafleden binnen de sectorplan disciplines is sinds 2016 met 35% gestegen, mede door het succesvolle FNWI stimuleringsbeleid.

#### **A.2.1 Toekomstvisie van de Radboud Universiteit voor de informatica**

Informatica aan de RU is georganiseerd binnen het instituut ICIS en focust op digital security, data science en software science, met als focusgebieden 'security en privacy', '*machine learning*', 'data modelleren en analyseren' en software. In de twee meest recente onderzoeksvisities informatica (over de periodes 2002–2008 en 2009–2014) is ICIS als beste beoordeeld (van de negen instituten in Nederland). De kwaliteit van het informaticaonderzoek in Nijmegen blijkt verder onder meer uit 3 ERC-AdvG, 1 ERC-ConsG, 2 ERC-StG, 1 VICI, 2 VIDI en 9 VENI toekenningen in de laatste tien jaar. De onderwijsprogramma's worden structureel als een van de beste beoordeeld (NSE-2018, bachelor en master als beste beoordeeld). Door de grote toename aan studenten dreigt een probleem te ontstaan in de student-staf-ratio. Digital Security is een onderzoekspeerpunt van de RU en een thema waarin ICIS leidend is in Nederland en toonaangevend in Europa. De 3 ERC-AdvG vallen in dit thema, dat in de volle breedte wordt beslagen, van cryptografie en hardware security tot privacy en juridische aspecten. Er is in Nijmegen brede samenwerking met het Radboudumc en de faculteiten Letteren, Rechten en Filosofie. In Digital Security wil de RU zich concentreren op de technische kant van privacybescherming en in systems security. In Data Science wil de RU nog sterker inzetten op methoden en technieken voor *machine learning* en *information retrieval*. Er wordt binnen en buiten de RU nauw samengewerkt, onder meer binnen het Radboud Data Science Centre en via de profilering Radboud-AI. In Data Science wil de RU investeren in posities in *large-scale machine learning*. Het onderzoek in Software Science richt zich op fundamentele technieken om de correctheid van software te garanderen en de complexiteit van grote softwaresystemen te beheersen. Software Science heeft hiermee een vooraanstaande positie in het onderzoeksgebied 'formele methoden', waarin de RU verder wil investeren. In alle gebieden is er intensieve samenwerking en afstemming met andere universiteiten (met name TU/e, TUD, UT) en landelijke platforms (zoals IPN, DSPN, AINed, en VERSEN).

#### **A.2.2 Toekomstvisie van de Radboud Universiteit voor de natuurkunde**

De Nijmeegse natuurkunde concentreert zich op twee gebieden: 1) moleculaire en gecondenseerde materie, met een sterke focus op geavanceerde spectroscopie, inclusief de wereldwijd unieke onderzoeksfaciliteit HFML-FELIX en 2) hoge-energiefysica (HEF), met een focus op nieuwe fysica voorbij het Standaard Model van de deeltjesfysica. De reputatie van het natuurkundeonderzoek blijkt uit het grote aantal prestigieuze grants: 2 Spinoza prijzen, 3 ERC-AdvG, 4 ERC-StG, 3 VICI, 7 VIDI en een cruciale bijdrage aan de Nobelprijs voor grafeen in 2010. RU richt zich de komende jaren op drie focusgebieden: 1) Gravitatie en deeltjesfysica, met leidende RU-bijdragen aan grootschalige experimenten (ATLAS@CERN, Auger). Deze lijn is recent versterkt met de strategische keuze voor het raakvlak deeltjesfysica/zwaartekracht en een nieuwe onderzoeksgroep Quantumgravitatie. Met de bestaande zwaartekrachtsgolvenactiviteiten geeft dit RU een sterke uitgangspositie in de snelgroeijende landelijke zwaartekrachtfysica en haar ambitie om een (inter)nationaal concurrerende masteropleiding op dit gebied te creëren. HEF wil hier haar onderzoeksprofiel aanscherpen door versterking van haar mondiale pieken (quantum zwaartekracht, radiodetectie, kosmische straling), en inhoudelijke aanvulling (donkere materie, sterke/computationele zwaartekracht, instrumentatie Einstein Telescoop). 2) Quantum Materialen, waar bottom-up fabricage en wisselwerking tussen elektronen, spins, dimensionaliteit en topologie leiden tot nieuwe elektronische en magnetische eigenschappen. Het begrijpen

van deze systemen, in en uit evenwicht, vereist nieuwe, op data science gebaseerde, theoretische aanpakken, en geeft ook op het brein geïnspireerde mogelijkheden voor energie-efficiëntere ICT. Hier liggen uitstekende mogelijkheden voor samenwerkingen met informatica en neurowetenschappen, ook op onderwijsgebied.

3) Geavanceerde spectroscopie, vooral op het unieke grensvlak van HFML-FELIX op het gebied van THz-spectroscopie in hoge magneetvelden. Daarnaast moet uitbreiding plaatsvinden van de hoge precisie scanning-probe microscopie met tijdsopgeloste spectroscopie en introductie van nieuwe vormen van ultrasnelle en hoge resolutie spectroscopie om moleculaire interacties in detail te kunnen bestuderen. Naast fundamentele kennis levert dit belangrijke maatschappelijke impact op door allerlei (industriële) toepassingen voor sensor en medische technologie. Met de gelijktijdige inzet op computationele quantumchemie zal dit de krachtige verbinding tussen fysica en chemie aan de RU en de aantrekkelijkheid voor buitenlands talent verder versterken.

### **A.2.3 Toekomstvisie van de Radboud Universiteit voor de scheikunde**

De chemie in Nijmegen ontleent haar kracht aan twee internationaal gerenommeerde clusters: 1) Het cluster moleculaire chemie heeft een sterke focus op onderzoek op het raakvlak tussen chemie en biologie, en de studie van complexe moleculaire systemen. Het cluster speelt een leidende rol in twee zwaartekrachtprogramma's (Functional Molecular Systems en Building a Synthetic Cell). 2) Het cluster fysische chemie bestudeert de structuur van en wisselwerkingen tussen (individuele) moleculen onder gecontroleerde omstandigheden. Dit cluster heeft nauwe banden met de moleculaire fysica binnen hetzelfde IMM en bovendien heeft ze toegang tot de unieke onderzoeksfaciliteiten in Nijmegen (o.a. HFML-FELIX). De internationale kracht van beide clusters blijkt uit het grote aantal prestigieuze 'personal grants' (1 Spinozaprijs, 4 ERC-AdvG, 1 ERC-Con, 6 ERC-StG, 3 VICI en 4 VIDI) in de afgelopen tien jaar. De RU wil zich in de komende periode richten op drie focusgebieden:

1) Complexe moleculaire systemen, waar behoefte is aan een sterke theoretische onderbouwing van complexe systemen, alsmede een uitbreiding naar anorganische systemen, ook vanuit het oogpunt van onderwijs. Het bouwen van een synthetische cel vergt een verder begrip van levende systemen vanuit een fysischchemische optiek, en een versterking van onze activiteiten in de biofysische chemie.

2) Chemie van het leven, met name de chemische biologie en medicinale chemie. Ontwikkelingen op het gebied van immunologie en nanomedicine zorgen voor een radicaal nieuwe kijk op het ontwerpen en synthetiseren van nieuwe medicijnen. De moleculaire cluster kan hierbij een leidende rol spelen door de samenwerking met het RIMLS en het Radboudumc te versterken en een nieuwe masterspecialisatie op het terrein van de medicinale chemie aan te bieden. Binnen deze master past ook een nieuwe en unieke onderzoeksrichting op het gebied van de neurochemie in samenwerking met het Donders Instituut.

3) Fundamentals & methods of chemistry, met name de analytische chemie, spectroscopie en computationele chemie, waar nieuwe investeringen op het gebied van data science en theorie van fundamentele eigenschappen van moleculen een krachtige verbinding tussen de chemie, de fysica en de andere sectorplandisciplines zal bewerkstelligen.

### **A.2.4 Toekomstvisie van de Radboud Universiteit voor de wiskunde**

De RU heeft binnen het instituut IMAPP een sterke traditie in de algebra en meetkunde, en de mathematische fysica, en meer recent wordt er ingezet op de toegepaste statistiek en toegepaste analyse. In de afgelopen jaren is FNWI zeer succesvol geweest met 1 Spinozaprijs, 3 VIDI, 7 VENI, en 4 TOP-projecten. Met het thema *Homotopical and derived geometry* is ingezet op stormachtige ontwikkelingen in de algebra, meetkunde en topologie die gerelateerd zijn aan hogere categorieën en homotopietheorie. Dit vormt een ware revolutie in de wiskunde die internationaal zeer in de belangstelling staat en een sterk verbindend karakter heeft tussen bestaande kernthema's van de wiskunde aan de RU. De ambitie is om nationaal en internationaal een Center of Excellence te worden met meetkunde als overkoepelend thema. De RU wil inzetten op de thema's statistisch leren, dynamische data en geometrische en stochastische evolutie. Deze wiskundige speerpunten zijn van groot belang voor maatschappij en industrie, en sluiten aan bij de interesses van vele studenten. De wiskunde heeft de unieke gelegenheid om intensief samen te werken met ICIS en DCN. De recent versterkte toegepaste analyse, gericht op numerieke en stochastische aspecten van partiële differentiaalvergelijkingen (PDE), heeft belangrijke toepassingen op algoritmes voor

AI en data science, wat de synergie tussen de wiskunde en de genoemde instituten verder zal vergroten. In de mathematische fysica wil de RU excelleren in (functionaal)analyse, PDE en niet-commutatieve meetkunde om algemene relativiteitstheorie en quantum(velden)theorie zowel apart te bestuderen als met elkaar te verbinden. Dit sluit aan bij Route 2 van de NWA, met name bij de *game changers* Einstein Telescoop en DIEP (Dutch Institute for Emergent Phenomena). In IMAPP heeft dit een duidelijke link met de afdelingen Astrofysica en Hoge Energy Fysica (HEF).

### **A.3. Rijksuniversiteit Groningen**

De Faculteit Science and Engineering (FSE) van de RUG is verantwoordelijk voor onderzoek en onderwijs in een breed scala van bèta- en ingenieursdisciplines, waarbij het herbergen van zowel algemene als technische varianten landelijk uniek is. De strategie van FSE is vanuit disciplinaire sterktes over deze volle breedte wetenschappelijke doorbraken te bereiken in interdisciplinaire samenwerkingen en bij te dragen aan technische innovaties middels het beheersen van de gehele lijn van fundament tot toepassing. Het onderzoek in FSE is daarom georganiseerd in 10 veelal multidisciplinaire onderzoeksinstituten, welke verder met elkaar zijn verbonden in 4 faculteitsbrede thema's: Data Science and Systems Complexity, Molecular Life and Health, Advanced Materials, en Adaptive Life. Een goed voorbeeld is het materialenonderzoek, dat natuurkundigen, scheikundigen en moleculair biologen verenigt, en sinds 1999 vanuit de Dieptestrategie erkend is als sterkte van Groningen. Deze samenwerking wordt momenteel uitgebreid naar informatica, kunstmatige intelligentie en wiskunde in het programma Cognigron, gericht op ontwerpen en maken van materialen met intrinsieke cognitieve functionaliteit. Buiten de faculteit onderhoudt FSE tal van samenwerkingen in de regio (zie de beschrijving in het Sectorbeeld Techniek) en met andere instellingen in binnen- en buitenland (onder andere Zwaartekracht, NWO Roadmap Infrastructuur, EU Flagships en ITN's). Internationalisering in onderzoek en onderwijs ziet FSE als belangrijk instrument voor kwaliteitsverhoging. FSE is landelijk voorloper op het gebied van internationalisering van haar opleidingen. Er zijn sterke samenwerkingen met onderwijs- en onderzoekorganisaties in andere landen, zoals CSC in China (40-50 promovendi per jaar). Sinds 2011 is de gemiddelde instroom van studenten in de hier relevante disciplines verdubbeld, zonder dat de stafomvang gelijke tred heeft gehouden. Herstel van een gezonde student-staf ratio is daarom een speerpunt van de faculteit. Met haar Rosalind Franklin programma is de faculteit al jaren een voorbeeld van proactieve aanpak van de genderonbalans. Dat beleid wordt met kracht voortgezet en uitgebreid, onder andere door een vernieuwde aanpak rond personeelswerving.

#### **A.3.1 Toekomstvisie van de Rijksuniversiteit Groningen voor de informatica**

De expertise en kracht van de Informatica, inclusief kunstmatige intelligentie (KI) bij de RUG is geconcentreerd rond de focusgebieden Data Science & AI (in alle drie de deelgebieden 'Data modelling & analysis', 'Machine learning' en 'Machine reasoning & interaction') en in het focusgebied 'Software'. Het ontwikkelen van fundamentele wiskundige, logische en informatie-theoretische concepten die nodig zijn om computationele methoden met 'intelligente' of 'cognitieve' eigenschappen van een solide basis te voorzien, is hierbij een samenbindend element. De internationale kracht blijkt uit onder andere de top-5 ranking op het gebied van de softwarearchitectuur, deelname aan Human Brain EU Flagship Project, grote H2020-subsidies, het EU Cofund PhD trainingprogramma Data Science & Systems Complexity en uit de toekenning van 2 VENI en 1 VIDI subsidie in de periode 2014-2018. De faculteit zal zich in de komende periode versterken in de genoemde vier focusgebieden. Grote toestroom van studenten noopt tot stevige uitbreiding van de staf, een ontwikkeling die de faculteit al heeft ingezet en die met deze sectorplannen zal worden verstevigd. Gezien de toenemende behoefte aan hooggekwalificeerde informatici zal de RUG inzetten op een verdere groei van de bachelorinstroom tot vierhonderd studenten in 2024. De recente samenvoeging van de Informatica, de Kunstmatige Intelligentie en de Wiskunde binnen het nieuwe Bernoulli Instituut heeft de slagkracht van deze disciplines en de focus en kruisbestuiving van het onderzoek enorm vergroot, met name binnen Data Science and Systems Complexity, en het hierboven genoemde CogniGron programma. Versterking binnen de gekozen focusgebieden zal aanvullende expertise leveren voor deze thema's. De faculteit legt hierbij de nadruk op de fundamentele informatica die nodig is om dit onderzoek een stevige basis te geven in Groningen. Een Zwaartekrachtvoorstel 'Hybrid Intelligence'



met LEI, TUD, UU en VU is recent ingediend. Landelijke afstemming en coördinatie vindt plaats via het IPN, de Vereniging Software Engineering Nederland en de landelijke onderzoeksscholen.

### **A.3.2 Toekomstvisie van de Rijksuniversiteit Groningen voor de natuurkunde**

De kracht van de natuurkunde bij de RUG is geconcentreerd rond de vier profileringsthema's Particle & Gravitational Physics (PGP), Quantum Materials & Technology, Energy & Sustainability en Life & Health. De kracht blijkt onder andere uit persoonlijke grants, over 2014-2018: 2 ERC Starting en 1 ERC Consolidator grant, 2 VENI, 3 VIDI, 2VICI grants, 1 Spinozapremie, 1 Akademietoelating, de Physicaprijs 2018. De faculteit zal zich versterken in drie focusgebieden. Versterking van PGP is nodig om het Van Swinderen Institute for Particle Physics and Gravity verder uit te bouwen, met name in de bestaande sterktes 'Gravity in the Early Universe' en 'Testing Fundamental Symmetries'. Dit instituut neemt integraal deel aan het NIKHEF samenwerkingsverband, waarbinnen de strategie wordt afgestemd. Binnen de focusgebieden Quantum Materials & Technology en Energy & Sustainability is de faculteit sterk vanuit de functionele nanomaterialen (Dieptestrategie sinds 1999 en partner NanoLabNL). Uniek hierbij is de sterke integratie van natuurkunde, scheikunde en moleculaire biologie. In het kader van het CogniGron programma (zie boven) wordt ook intensieve samenwerking met informatica, kunstmatige intelligentie en wiskunde ingezet. Versterking wordt beoogd op fundamenteel onderzoek naar nieuwe hybride materiaalsystemen, met atomaire precisie ontworpen en gefabriceerd, met toepassingen voor energie, duurzaamheid en elektronica/computing. Dit is gerelateerd aan het recent met RU en UT ingediende Zwaartekrachtvoorstel Bits en Brains. Op het gebied van Energy & Sustainability heeft ook het atmosfeeronderzoek in Groningen grote kracht. Dit is ingebed in landelijke samenwerkingen, zoals deelname in de NWO Roadmap faciliteit Ruisdael Observatorium en de recente Zwaartekrachtaanvraag Dutch Atmospheric Research Center. Een kleine maar originele onderzoekslijn is de biomimetica, met onder andere groot succes in het verhogen van windmolenrendementen. De faculteit beoogt deze activiteit te versterken. Op het gebied van Life & Health bestaat in Groningen belangrijke activiteit in de instrumentatie voor protontherapie, die wordt uitgevoerd in nauwe samenwerking met het UMCG.

### **A.3.3 Toekomstvisie van de Rijksuniversiteit Groningen voor de scheikunde**

Groningen behoort qua omvang van de scheikundestaf bij de top-3 instellingen van Nederland, met sterktes in alle vijf focusgebieden. De internationale kracht blijkt onder andere uit vele persoonlijke grants en prijzen. In de periode 2014-2018: 2 ERC Starting, 2 ERC Consolidator en 5 ERC Advanced Grants; voorts 8 VENI, 8 VIDI, en 4 VICI grants en uiteraard de Nobelprijs in 2016. De faculteit zal zich versterken in vier van de vijf focusgebieden. Katalyse is een traditionele rode draad in Groningen die binnen de Chemische Technologie (incl. biotechnologie) versterking zal krijgen. Dit is noodzakelijk om de markt van voldoende afgestudeerden te voorzien en de sterke relatie met de regionale industrie (Chemport Europe) en landelijke partners (Topsector Chemie en ARC-CBBC, waarvan de RUG founding partner is) te continueren, met name op thema's als verduurzaming en vergroening. Binnen de Chemie van Materialen heeft Groningen grote kracht in de samenwerking tussen chemici, fysici en moleculair biologen (Dieptestrategie nanomaterialen en FOM Focusgroep Next Generation PV). Behoud van de internationale toppositie vereist verdere versterking in materiaalsynthese. Binnen Chemie van Leven heeft de RUG een sterke positie in de chemische biologie, waar wordt samengewerkt in het Zwaartekracht programma BaSyC (synthetische cel, met TUD, AMOLF, WURR, RU, VU) en het recent ingediende Zwaartekrachtvoorstel op het gebied van antibiotica (met LEI, UU, VU, TUD, WURR), alsmede in de structuurbiologie, waar landelijke samenwerking is in het kader van NEMI, en Europees in ESFRI (INSTRUCT). De stormachtige vernieuwingen in deze competitieve gebieden vragen om investeringen in nieuwe staf en apparatuur. Het focusgebied 'Complexe moleculaire systemen' is recent al versterkt. Tot slot is de faculteit in het focusgebied 'Methodes' krachtig in de synthese (nieuwe reacties en moleculen, reactiemechanismen) en computationele methodes (breed spectrum van tijd- en lengteschalen). Deze vormen een belangrijk fundament van de chemie en worden ingezet ter versterking van alle vijf focusgebieden.

### **A.3.4 Toekomstvisie van de Rijksuniversiteit Groningen voor de wiskunde**

De kracht van de wiskunde bij de RUG is geconcentreerd rond de profileringsthema's Symmetrie en Meetkunde, Cryptografie en Algoritmes, en Dynamische Data. De reputatie van Groningen in Dynamische

Data blijkt uit het feit dat de universiteit al vanaf de start een belangrijke rol speelt in het NWO-cluster Nonlinear Dynamics of Natural Systems. Het onderzoek aan Systems & Control is van wereldniveau en het onderzoek in de 'wiskundige systeemtheorie' van FSE draagt hier essentieel aan bij. De sterkte blijkt verder uit de deelname aan de Wiskundeclusters STAR, GQT en DIAMANT. De faculteit zal zich in de komende periode versterken in de genoemde drie profileringsthema's en bovendien in Optimalisatie en Onderzekerheidskwantificatie. De versterkingen zijn erop gericht verdere verbindingen te vormen tussen de wiskunde en het thema Data Science and Systems Complexity. De focusgebieden 'Cryptografie en Algoritmes' en 'Optimalisatie' bieden goede mogelijkheden om de samenwerking met de Informatica te versterken. Voor het profileringsthema 'Symmetrie en meetkunde' wordt versterking gezocht in de richting van dynamische systemen en aansluitend bij het CogniGron programma. Versterking in de dynamische systemen wordt gezocht in de meer theoretische en fundamentele kant. Nationaal vindt de samenwerking en afstemming plaats via de wiskundeclusters, PWN, en de landelijke onderzoekscholen. Met TU/e en TUD is een Zwaartekracht aanvraag Systems and Control ingediend. In de periode 2012-2017 is de bachelorinstroom verdubbeld, terwijl de staf constant is gebleven. Ook in studierichtingen waarvoor de wiskundestaf serviceonderwijs verzorgt zijn de studentenaantallen sterk gestegen. Ondanks recente uitbreiding van de staf is de stafstudent-ratio nog steeds te laag. Daarbij heeft FSE de ambitie meer wiskundestudenten op te leiden, vooral ook in de masteropleiding. Extra instroom van studenten wordt verwacht door het aanstellen van nieuwe staf die nieuwe vakken gaat doceren, waardoor het curriculum voor studenten aantrekkelijker wordt.

#### **A.4. Technische Universiteit Delft**

Als universiteit die midden in de maatschappij staat heeft TUD de ambitie om oplossingen aan te dragen voor de belangrijkste uitdagingen van de 21e eeuw, onder meer op het gebied van duurzaamheid, gezondheid, veiligheid, privacy en de digitale samenleving. TUD doet grensverleggend wetenschappelijk en technisch onderzoek met het oog op baanbrekende innovaties en heeft daarnaast als doel om de leiders van morgen op te leiden. Wereldwijd gezien behoort TUD tot de top van technische universiteiten. Het prestigieuze Kavli Institute of Nanoscience Delft is een verdere blijk van internationale erkenning. TUD beschouwt diversiteit en inclusiviteit als onmisbaar voor de samenstelling van succesvolle teams. Het Delft Technology Fellowship voor vrouwelijk talent draagt bij aan een betere genderbalans. TUD doet vernieuwend bètaonderzoek in negen afdelingen van twee faculteiten en in QuTech, het instituut voor quantumcomputing en quantuminternet dat de status van Nationaal Icoon draagt. De universiteit participeert in drie Zwaartekrachtprogramma's, waarvan in twee als penvoerder, en in het Europese Quantum Flagship. Gezondheidsonderzoek vindt plaats binnen Medical Delta, het samenwerkingsverband met de UMC's en universiteiten van Rotterdam en Leiden. TUD maakt deel uit van 4TU, LDE, IDEA league en CESAER. De maatschappelijke ambities bepalen ook de onderwijsvisie. TUD leidt studenten op in brede bachelor- en specialistische masteropleidingen gekoppeld aan het onderzoek. Jonge Delftse ingenieurs combineren fundamentele kennis met technische vaardigheden en een groot maatschappelijk verantwoordelijkheidsgevoel, waardoor ze alles in huis hebben om mondiale uitdagingen het hoofd te bieden. Binnen het bètadomein verzorgt TUD zes bachelor- en acht masteropleidingen en heeft een groot marktaandeel in de landelijke bacheloropleidingen. De bacheloropleidingen LST en MST zijn joint-degree scheikundeopleidingen met de Universiteit Leiden.

##### **A.4.1 Toekomstvisie van de Technische Universiteit Delft voor de informatica**

Binnen de informatica ligt de focus op Data Modeling & Analysis, Machine Reasoning & Interaction, Software en Genetwerkte Computer- & Embedded Systemen. Op deze thema's kreeg TUD de afgelopen vijf jaar 2 Veni's, 3 Vidi's, 1 NWO-TOP1, 2 NWO-TOP2's en 2 Aspasia's. De omvang in de tweede en derde geldstroom is € 5 per jaar. Informatica Delft is razend populair onder studenten in zowel bachelor als master opleidingen en maakt een enorme groei door. Hierdoor staat de studentstaf-ratio momenteel ernstig onder druk, met name in de master. De sectorgelden zullen direct worden aangewend om het onderzoeks karakter van de master te versterken en op grotere schaal te kunnen handhaven. Specifiek wil TUD de sectorgelden op twee hoofdassen inzetten: Responsible AI en Data-Driven Software Systems Engineering (DDSSE). Responsible AI vergt Responsibility-by-Design in zowel de klassieke als data-



intensieve AI (inclusief data analysis en *machine learning*). Er zijn nieuwe methodologische, algoritmische en systeemtechnische AI-concepten nodig die zorgen voor voldoende menselijke controle over de besluitprocessen in en met AI-systemen, en dat hun uitkomsten te vertrouwen, uitlegbaar en niet schadelijk zijn. Het ontwikkelen van deze nieuwe AI-concepten vergt een doeltreffende combinatie van expertise in *network data science*, *human computing*, *agent technology*, *algorithmics*, *HCI*, *user modeling*, *data analysis*, *data visualization* en *machine learning*. De DDSSE-as omvat zowel fundamenteel als empirisch onderzoek naar de constructie van complexe softwaresystemen. Softwaresystemen spelen een centrale rol in de moderne maatschappij. Ze worden steeds complexer en raken meer en meer onderling verweven. TUD beoogt deze toenemende complexiteit en verwevenheid beheersbaar te houden door onderzoek te doen op het gebied van *distributed systems*, *web science*, algoritmie, cybersecurity en software engineering. De empirische component wordt hierbij steeds sterker. Het opent de mogelijkheid om data-gedreven AI-technieken, zoals *machine learning*, in te zetten om de constructie van complexe softwaresystemen te optimaliseren.

#### **A.4.2 Toekomstvisie van de Technische Universiteit Delft voor de natuurkunde**

Binnen de natuurkunde ligt de focus op Quantum Materials & Technologies, Life & Health, Energy & Sustainability en Precision Measurement & Fabrication. De Delftse natuurkunde participeert in drie Zwaartekrachtprogramma's (twee keer als penvoerder), is penvoerder van twee ERC Synergy grants en telt drie Spinoza-laureaten. De kracht van TUD blijkt verder uit het aantal persoonlijke subsidies bij NWO [8 Veni, 13 Vidi, 3 Vici] en ERC [5 Advanced, 4 Consolidator, 9 Starting] in de afgelopen vijf jaar. De omvang in de tweede en derde geldstroom (excl. QuTech) is M€ 31 per jaar. TUD werkt met de overheid en bedrijven aan de Quantum Campus, een ecosysteem voor quantumtechnologie in Nederland. De faculteit versterkt hiervoor haar fundamentele quantumonderzoek op de thema's *quantum-sensing*, *transduction* en *matter design*. TUD werkt aan de missie van het nabouwen en integreren van functionele biomoleculaire systemen buiten de cel, in combinatie met fysisch-chemisch onderzoek aan moleculaire processen binnen de cel. Behalve fundamenteel inzicht in levensprocessen levert dit onderzoek inspiratie op voor nieuwe (zachte) materialen en toepassingen in het gezondheidsdomein. Binnen het gezondheidsdomein is tevens aandacht voor de inzet van straling en radionucleïden voor diagnostiek en therapie. Met het oog op de energietransitie wil de faculteit het onderzoek en de ontwikkeling van materialen en processen voor energieopslag en -conversie uitbreiden, met de nadruk op batterijen. Op het gebied van procestechnologie en materialen wordt nauw samengewerkt met de chemiecollega's. Investerings in precisie-instrumentatie en -imagingtechnieken zijn nodig voor de in situ karakterisering van materialen, onderzoek naar processen in levende cellen/weefsels en voor *personalized medicine*. De samenwerking van TUD met SRON op het gebied van onderzoek en ontwikkeling van instrumentatie voor ruimteonderzoek zal verder worden versterkt. De unieke infrastructuur van TUD, waaronder de nanofabricagefaciliteit en de onderzoeksreactor met de binnenkort beschikbare koude neutronenbron OYSTER, zijn onmisbaar voor het realiseren van de onderzoeksambities.

#### **A.4.3 Toekomstvisie van de Technische Universiteit Delft voor de scheikunde**

Binnen de scheikunde ligt de focus op Procestechnologie, Biotechnologie, Katalyse, Functionele Materialen en Chemische Biologie. Scheikunde in Delft participeert in één Zwaartekrachtprogramma en telt één Spinoza-laureaat. De kracht van TUD blijkt verder uit het aantal persoonlijke subsidies van met name jonge stafleden bij NWO [9 Veni, 4 Vidi, 2 Vici] en ERC [1 Advanced, 6 Consolidator, 5 Starting] in de afgelopen vijf jaar. De omvang in de tweede en derde geldstroom is M€ 18 per jaar. De ambitie om de energietransitie naar de praktijk te brengen vereist onderzoek naar nieuwe materialen en processen voor het grootschalig opwekken van groene energie, zoals zonnecellen, katalysatoren en membranen. Onderzoek op het gebied van e-Refinery, vanaf het duurzaam opwekken van elektriciteit tot aan de grondstoffen en brandstoffen die daarmee gemaakt worden, zal worden versterkt. Expertise om deze volledige keten op conceptueel procesniveau te bestuderen is essentieel. Daarnaast is nieuwe kennis nodig op het gebied van transportverschijnselen, katalyse, scheidingstechnologie en reactorkunde, met speciale aandacht voor elektrificatie. Onderzoek naar industriële opschaling gebeurt in samenwerking met werktuigbouwkunde en elektrotechniek. Ontsluiting van nieuwe, duurzame en goedkope grondstoffen is ook essentieel voor grootschalige productie van plastics en transportbrandstoffen in de biotechnologie.

Productie en karakterisering van functionele materialen uit afvalstromen en elektrificatie van biotechnologische processen zijn hierbij belangrijke nieuwe speerpunten in TUD-onderzoek. Elektrificatie zal, op het grensvlak met Chemische biologie, worden nagestreefd door (re)constructie van microbiële metabole netwerken voor inzet in e-biorefineries. Parallel bioprocestechnologisch onderzoek zal zich richten op vertaling van deze onderzoekslijnen naar schaalbare, duurzame industriële processen. Chemische biologie is, buiten de biotechnologie, belangrijk voor analyse van complexe biomoleculaire systemen (zie natuurkunde). Het TUD-onderzoek richt zich verder op de ontwikkeling van nieuwe functionele materialen voor toepassing in, bijvoorbeeld, de biomedische sector. Naast synthese en interactie van essentiële bouwstenen zal complex, contextafhankelijk gedrag van nieuwe functionele materialen worden gemodelleerd en geanalyseerd.

#### **A.4.4 Toekomstvisie van de Technische Universiteit Delft voor de wiskunde**

TUD streeft ernaar om essentiële bijdragen te leveren aan de frontlinie van wiskundig onderzoek, wiskundige modellen te ontwikkelen en bestuderen, kennis te verbreiden en daarmee bij te dragen aan huidige en toekomstige technologische innovaties. Qua onderwijs en onderzoek zijn er nauwe banden met veel groepen binnen TUD. Qua onderzoek ligt de focus op Geometrische en Stochastische Evolutie, Statistisch Leren en Cryptografie en Algoritmes. TUD kreeg in de afgelopen vijf jaar vier Vidi's en heeft een Aspasia-toezegging. Verder zijn er twee NWO-TOP1-aanvragen gehonoreerd. De omvang in de tweede en derde geldstroom is rond de M€ 1,5 per jaar. TUD zal zich binnen het domein wiskunde verder richten op de bestudering van (stochastische) partiële differentiaalvergelijking in de volle breedte. Dit behelst modellering van (onder andere fysische) verschijnselen, het afleiden van deze vergelijkingen vanuit microscopische dynamica, efficiënte en robuuste numerieke benaderingen van oplossingen en fundamentele eigenschappen van oplossingen. Gerelateerd aan dit thema wordt binnen TUD met verschillende onderzoeksgroepen samengewerkt, bijvoorbeeld met biofysica, transportplanning en aerodynamica. Als het gaat om computationele aspecten in dit thema is er veel samenwerking binnen het Delft Institute for Computational Science and Engineering en wordt sinds kort de minor Computational Science and Engineering aangeboden. Verder zal TUD de wiskundige uitdagingen aangaan die voortkomen uit het zich internationaal snel ontwikkelende veld van *machine learning* en kunstmatige intelligentie. Die uitdagingen liggen onder meer in de empirische procestheorie, Markov Chain Monte-Carlo, concentratieongelijkheden en snelle optimaliseringsprocedures. Vanwege de 'data-explosie' vraagt de maatschappij momenteel veel expertise in dit domein. TUD zal ook inzetten op het beantwoorden van fundamentele vragen die voortkomen uit de snelle ontwikkelingen in het kader van de quantumcomputer, onder andere in de discrete wiskunde, analyse en numerieke wiskunde. Op dit gebied, met name als het gaat om simulatie van quantumprocessen, vindt nauwe samenwerking plaats met natuurkundecollega's in de topological quantum computing.

#### **A.5. Technische Universiteit Eindhoven**

Het bètadomein binnen de Technische Universiteit Eindhoven is georganiseerd in drie afzonderlijke faculteiten, namelijk Technische Natuurkunde, Scheikundige Technologie, en Wiskunde en Informatica, terwijl ook de faculteit Biomedische Technologie een belangrijke component aan scheikunde- en natuurkundeonderwijs en -onderzoek heeft. De activiteiten van het bètadomein zijn nauw verweven met die van het techniekdomein. Het bachelor- en masteronderwijs is binnen de afzonderlijke faculteiten opgelijnd. De laatste jaren kent het bètadomein een sterk groeiende studenteninstroom in alle vier de betrokken faculteiten. Binnen deze faculteiten zijn vier Zwaartekrachtprogramma's actief. Nationaal en internationaal is TU/e-bèta met name bekend om haar wetenschappelijk sterktes in complexe moleculaire systemen, chemische procestechnologie, data science, fotonica en plasmatechnologie. Uniek is de nauwe samenwerking van het energieonderzoek met DIFFER, gehuisvest op de TU/e campus. Met de Universiteit Utrecht is een strategische alliantie gevormd die focust op *regenerative medicine, imaging, solar fuels catalysis en plasma medicine*. Naast DIFFER dragen ook de aanwezigheid van het Institute for Complex Molecular Systems (ICMS), Jheronimus Academy of Data Science, Photon Delta en Chemelot InSciTe bij aan dit beeld. Onderwerpen als stromingsleer en materiaalonderzoek vindt men aan de TU/e prominent terug bij zowel bèta als techniek. Internationale samenwerking vindt onder andere plaats in Eurotech

verband (samenwerking EPFL, Ecole Polytechnique Parijs, TU München, DTU Denemarken). Het multidisciplinair onderzoek in het oplossen van maatschappelijke uitdagingen krijgt binnen de TU/e vorm binnen de interdisciplinaire onderzoeksgebieden Smart Materials & Processes, Bioengineering Health, Complex High-Tech Systems, Renewable Energy, Human-Centered Systems and Environments, en Data-driven Intelligent Systems; de sectorplannen bèta en techniek bieden uitstekende kansen voor disciplinaire versterking en kruisbestuiving. Het bètadomein van de TU/e is sterk verweven met het Brainport Eindhoven ecosysteem (o.a. ASML, Philips en NXP) en alle bètafaculteiten werken nauw samen met de nationale en internationale industrie (Shell, ASML, Philips, Océ, AkzoNobel, Nouryon, BASF, Dow, FrieslandCampina, et cetera).

#### **A.5.1 Toekomstvisie van de Technische Universiteit Eindhoven voor de informatica**

Informatica Eindhoven is een van de grootste informaticaafdelingen in Nederland. Onderzoek in de vier secties (Algorithms & Visualization; Model Driven Software Engineering, Security and Embedded Networked Systems; Information Systems) varieert van nieuwsgierigheidsgedreven tot meer toegepast, en de afdeling heeft een vruchtbare samenwerking met de industrie. Ongeveer de helft van het budget van Informatica is afkomstig uit de tweede en derde geldstroom. De laatste jaren leverden 2 Vici, 3 Veni en één ERC Starting Grant laureaat op en het Zwaartekracht programma NETWORKS. Eindhoven is sterk in Algoritmiëk, Data Science (Data Science Center; JADS: bachelor, master, PDENG, met Tilburg) en Embedded Software & Systems. De toekomstvisie voor Informatica is er een van groei. Groeiende studentenaantallen en met name groei in de nieuwe Data Science opleidingen liggen hieraan ten grondslag. Binnen de sectorplannen wordt ingezet op de landelijke onderwerpen algoritmiëk, *machine learning*, security & privacy en *computer systems/embedded systems*, direct gekoppeld aan de vier secties. Hiermee speelt Informatica van TU/e in op twee grote ontwikkelingen binnen de informatica van de afgelopen en komende tijd, namelijk de enorme vlucht die AI heeft genomen, en met name *machine learning*, en de toenemende verbondenheid van *devices* (IoT, 'Internet of Things'). Het zal hierbij gaan om fundamentele vragen omtrent architectuur, robuustheid en veiligheid van decentrale systemen, over data intensieve algoritmen en over *embedded intelligence*. Deze uitbreiding is hard nodig om de keuze voor Data Science, zoals die vier jaar geleden samen met Wiskunde is gemaakt, uit te voeren nu de opleidingen vollopen. Ook het huidige TU/e initiatief op AI wordt verder vormgegeven. De samenwerking binnen de TU/e (in de centers DSC/e en HTSC, en met Wiskunde) wordt versterkt en ook het programma met Tilburg (JADS). Dat geldt eveneens voor de opleiding samen met Nijmegen (Information Security) en voor de samenwerking met de andere technische universiteiten.

#### **A.5.2 Toekomstvisie van de Technische Universiteit Eindhoven voor de natuurkunde**

De faculteit Technische Natuurkunde van de TU/e kent drie onderzoekclusters: Fluids, Bio & Soft Matter (FBSM), Plasma and Beams (PB), en Nano, Quantum & Photonics (NQP). De Eindhovense plasmafysica is nationaal uniek en staat internationaal uitstekend op de kaart. Het cluster FBSM is coherent, sterk en nationaal goed gepositioneerd via het J.M. Burgerscentrum. De Eindhovense fotonica is een erkend nationaal zwaartepunt binnen het cluster NQP. Die sterkte wordt weerspiegeld door het Zwaartekrachtprogramma Integrated Nanophotonics. Kruisverbindingen tussen de drie clusters worden gelegd in het Center for Computational Energy Research (CCER), het Center for Quantum Materials & Technology (QT/e) en het Institute for Photonic Integration (IPI). De internationale kracht blijkt uit een aantal ERC-grants en de nationale sterkte van de Eindhovense natuurkunde blijkt uit het grote aantal Vici subsidies (>10). De drie clusters zijn goed op te lijnen langs vier van de zes thema's van het nationale disciplinebeeld natuurkunde. In constructieve afstemming met DIFFER is de faculteit van plan zich via alle drie haar clusters verder te versterken binnen het nationale thema Energy and Sustainability, met name op de gebieden materialen voor energieconversie en opslag, fusie, en fotonica. Het nationale thema Complex Systems, Soft Matter & Fluids wordt ingezet om disciplinaire versterking van de fysica van complexe vloeistoffen, soft (bio)matter en de plasmafysica te bereiken, met nadruk op nieuwe initiatieven op de grensvlakken tussen deze gebieden. Vanuit haar sterkte op het gebied van fotonica (IPI) alsmede via het QT/e zal de faculteit zich binnen het nationale thema Quantum Materials & Technology versterken op het gebied van strongly-interacting quantum systems (PB) en door nieuwe initiatieven op het gebied

van de (meta-)fotonica en nanomaterialen (NQP). Het nationale thema Precision Measurement and Fabrication vindt versterking in het thema 'fysica van quantum devices (NQP)'.

#### **A.5.3 Toekomstvisie van de Technische Universiteit Eindhoven voor de scheikunde**

De scheikunde in Eindhoven staat nationaal en internationaal hoog aangeschreven om haar hoogwaardige onderwijs en onderzoek aan geavanceerde materialen en duurzame procestechnologie. Gebaseerd op deze sterktes kent de faculteit twee thematische clusters: (i) moleculaire systemen en chemie van materialen en (ii) chemische procestechnologie. Chemische biologie is onderdeel van de faculteit Biomedische Technologie. Het onderzoek op de gebieden supramoleculaire chemie, materiaalchemie, chemische procestechnologie en katalyse staat internationaal hoog aangeschreven, wat blijkt uit deelname aan drie Zwaartekrachtprogramma's, het ARC Chemical Building Blocks Consortium, en de vele internationale samenwerkingen en subsidies (> 10 Vernieuwingsimpuls, > 10 ERC) en prijzen (o.a. 3x Spinoza, Nagoya Medal). Meer dan de helft van het onderzoeksbudget komt uit bilaterale en bredere samenwerkingen met de industrie. Nationaal vindt er onder andere afstemming plaats met de Universiteit van Utrecht (UU) op de gebieden van *regenerative medicine*, *imaging* en energieonderzoek. De drie zwaartepunten (i) 'duurzame procestechnologie en katalyse', (ii) 'materiaalchemie en functionele materialen' en (iii) 'complexe moleculaire systemen' zijn goed opgelijnd langs de gekozen hoofdthema's in het nationale disciplinebeeld scheikunde. Vanuit de unieke, sterke verbinding tussen duurzame procestechnologie en katalyse en in afstemming met de UU, zal de faculteit investeren in nieuwe posities die bijdragen aan maatschappelijke uitdagingen rond energietransitie en verduurzaming van de chemische industrie. Binnen het nationale thema materiaalchemie wordt gestreefd naar versterking van onderzoek naar energie(conversie)materialen, zoals het inbrengen van anorganische elementen in organische *devices* voor energieconversie en het ontwikkelen van innovatieve chemische oplossingen voor hergebruik van polymere materialen. Binnen de (inter)nationaal erkende Eindhovense sterkte rond funderend onderzoek aan supramoleculaire chemie wil de faculteit een stap maken richting functionele materialen met responsieve eigenschappen (bijvoorbeeld *soft robotics*) met toepassingen in gezondheid, energie en duurzaamheid. Binnen het nationale zwaartepunt complexe moleculaire systemen wordt ingezet op het uitbouwen van de systeemaanpak in de chemische biologie via modellering en karakterisering over meerdere lengteschalen.

#### **A.5.4 Toekomstvisie van de Technische Universiteit Eindhoven voor de wiskunde**

Wiskunde in Eindhoven is een van de grootste wiskundeafdelingen in Nederland en is georganiseerd in drie secties: Analysis & Scientific Computing, Discrete Mathematics en Stochastics. Het onderwijs en onderzoek scoren bij externe visitaties het allerhoogste niveau. Er zijn veel highprofile beurzen, waaronder twaalf Vernieuwingsimpulsbeurzen, drie ERC grants, het Networks Zwaartekracht-programma en meerdere NWO-TTW Perspectiefprogramma's. Het wiskundeonderzoek is in alle drie de secties sterk theoretisch en deels zelfs fundamenteel van aard, maar wordt gedreven door maatschappelijke en ingenieursvraagstukken. De Eindhovense Wiskunde heeft daarvoor langdurige samenwerkingen met bedrijven zoals ASML, Philips Medical Systems, Signify, NXP, Thermo Fisher en Shell, en met vrijwel alle faculteiten van de universiteit. Wiskunde in Eindhoven heeft ook vele nationale en internationale samenwerkingen: via o.a. het 4TU Applied Mathematics Institute, de drie nationale wiskundecusters DIAMANT, NDNS+ en STAR, het Platform Wiskunde Nederland, het onderwijssamenwerkingsverband MasterMath, het Landelijk Netwerk Mathematische Besliskunde, The Dutch-Flemish Society for Scientific Computing, en The European Consortium for Mathematics in Industry. Daarnaast is Wiskunde mede-oprichter van het Data Science Center Eindhoven en het Institute for Complex Molecular Systems. De toekomstvisie van Wiskunde in Eindhoven is er een van groei door toename van het aantal wiskundestudenten en door een grotere participatie in het onderwijs en onderzoek rondom de nieuwe Data Science curricula binnen JADS. TU/e Wiskunde richt zich al langer op complexe wiskundige vraagstukken, modellen en methoden die sterk zijn gerelateerd aan aspecten en karakteristieken van data en wil deze ontwikkeling versnellen en vergroten via de sectorplannen. De drie secties zullen hun theoretisch en fundamenteel modelgedreven onderzoek versterken met een fundamentele datagedreven aanpak, binnen de landelijke aandachtsgebieden uit het sectorbeeld (statistisch leren, genetwerkte data, dynamische data, en optimalisatie & onzekerheidskwantificatie). De unieke verwevenheid en verbondenheid met (onderzoeksdoelstellingen van) Informatica maakt Wiskunde in Eindhoven zeer sterk.

## A.6. Universiteit van Amsterdam

De Faculteit der Natuurwetenschappen, Wiskunde en Informatica (FNWI) van de Universiteit van Amsterdam (UvA) zet in op een sterke link tussen onderzoek en onderwijs, waarbij vanuit disciplines wordt samengewerkt in onderzoek en in disciplinaire en interdisciplinaire opleidingen. Specifieke keuzes binnen disciplines zijn gedefinieerd in eerdere sectorplannen (Natuur- en Scheikunde) en in afspraken over complementariteit met de VU (Wiskunde en Informatica). Hoewel vorig jaar is besloten niet verder te streven naar gemeenschappelijke huisvesting is de inhoudelijke samenwerking met de VU nog onverkort van toepassing in onderzoek en onderwijs. De terugloop in studenten in sommige disciplines is mogelijk te verklaren door de onzekerheid die er was rond de verhuizing. De ambitie is om in deze nieuwe context de instroom in de bètadisciplines (weer) substantieel te laten groeien, uitgaande van de sterktes en een gezamenlijke aanpak voor de aansluiting VO-WO. De insteek van de FNWI in het onderzoek is om de ingezette koers te versterken en de samenwerking intern en extern (inclusief de NWO-instituten op Amsterdam Science Park) te stimuleren. Een voorbeeld is het onderzoek naar gravitatie & astro particle physics (natuurkunde, wiskunde, sterrenkunde) gesteund door de sectorplankeuzes, het universitaire zwaartepunt GRAPPA en de samenwerking met VU en anderen in Nikhef. Bijzondere aandacht krijgt de verdere integratie van computationele methoden in fundamenteel onderzoek, in onderwijs en in co-creatie met bedrijven. Dit past in de keuze om het profiel 'Smart' (Artificial intelligence, quantum computing, network analyses, advanced instrumentation) verder te versterken, waarvoor de sectorplanmiddelen mede zullen worden aangewend. Vanwege de groei in studenten en onderzoeksprojecten wordt een nieuw gebouw rond dit thema gepland. Het onderwijsaanbod in de scheikunde en de natuur- en sterrenkunde bestaat uit UvA/VU *joint degrees* voor zowel bachelors en masters. Voor de wiskunde is er een UvA bachelor programma, en een master die nationaal is ingebed in Mastermath, met de UvA als penvoerder. Het UvA informatica-opleidingsaanbod bestaat uit drie bachelors en vijf masters, waarvan twee joint degree masters met de VU. Naast dit aanbod wordt er vanuit de disciplines meegewerkt aan interdisciplinaire opleidingen zoals bèta-gamma en Future Planet Studies, en in het UvA/VU Amsterdam University College AUC (*science track*). In bijgaande tabellen is het aantal studenten in de vier disciplines weergegeven, als ook het aantal vaste en tijdelijke stafleden.

### A.6.1 Toekomstvisie van de Universiteit van Amsterdam voor de informatica

Het Instituut voor Informatica (IvI) van de UvA speelt een leidende rol in het Nederlandse informaticavakgebied. Vanuit de UvA is bijvoorbeeld het COMMIT programma voor publiek-private samenwerking geleid en de universiteit is de initiator van het al genoemde landelijke Innovatie Centrum voor Artificial Intelligence (ICAI). IvI heeft een internationaal erkende sterke wetenschappelijke basis in het fundamentele informaticaonderzoek en zijn toepassingen. Het informaticaonderzoek aan de UvA heeft wereldwijd school gemaakt in bijvoorbeeld de *computer vision*, *information retrieval*, *systemen en security*, *computational science* en *deep learning*. De sectorgelden zullen worden ingezet om verbindingen te maken: binnen het instituut, de faculteit, en de regio om daarmee het onderzoek en het onderwijs te versterken. Dit zal worden bereikt door te investeren in onderzoek naar de fundamentele van analyse en modellering van data, machinaal leren, security en privacy en genetwerkte computer- en embedded systemen. Het doel is daarbij om bij te dragen aan het smart maken van domeinen, door veilige methoden te ontwikkelen om data te delen, te leren van grote hoeveelheden data, en computationele modellen te ontwikkelen. De specifieke domeinen waarop UvA Informatica zich wil richten zijn *urban computing* (versterking samenwerking met de stad), gezondheid (versterking samenwerking met Amsterdam UMC en bedrijven), en de bètadisciplines (versterking samenwerking met instituten in de FNWI – IoP, HIMS, ILLC, KdVI). Voor het onderwijs moet de investering onder andere de extra ruimte bieden die nodig is om de grote stroom bachelorstudenten in de Informatica, Informatiekunde, en Kunstmatige Intelligentie (KI) goed te bedienen, waardoor de dit jaar ingestelde numerus fixus voor KI zo snel mogelijk weer kan worden opgeheven.

### A.6.2 Toekomstvisie van de Universiteit van Amsterdam voor de natuurkunde

Het Institute of Physics (IoP) verricht fundamenteel natuurkundig onderzoek, zowel gedreven vanuit nieuwsgierigheid naar de werking van de natuur op het diepste niveau, als vanuit toepassingen in maatschappij en industrie. Het IoP heeft daarin sterke posities in de nationale focusgebieden Particle and Gravitational Physics (PGP); (astro)deeltjesfysica, snaartheorie, kosmologie, mathematische fysica),



Quantum Materials and Technologies (QMT; quantummaterie, quantumgassen en quantuminformatie, participatie in ARCNL) en Complex systems, Soft matter and Fluids (CSF; dynamica van complexe vloeistoffen en vaste stoffen, metamaterialen). Universitaire zwaartepunten waarin IoP een leidende rol heeft zijn GRAPPA, QMQI/QuSoft en Soft Matter. Het IoP heeft leidende rollen in twee NWO Zwaartekracht consortia: Delta-ITP (theoretische fysica) en het Quantum Software Consortium waarin ook KdVI en ILLC deelnemen. Het IoP profiteert sterk van de unieke concentratie van natuurkundeonderzoek op Amsterdam Science Park door intensieve samenwerking in al zijn focusgebieden met de vier NWO-instituten (Nikhef, AMOLF, ARCNL, CWI). Het IoP wil zijn toonaangevende positie in de drie focusgebieden via het sectorplan naar wereldwijd topniveau brengen en via de zwaartepunten interdisciplinaire samenwerking versterken. Daarmee verkrijgt het een aantrekkelijker profiel ten gunste van zowel de nodige groei van de studenteninstroom als van externe samenwerking (academisch én maatschappelijk). Binnen het focusgebied PGP wil IoP sterker inzetten op multi-messenger astrodeeltjesfysica (in samenwerking met Nikhef), en als verbinding van de focusgebieden PGP en QMT op het onderzoek naar emergentie van ruimte-tijd en van complex gedrag in sterk gecorreleerde systemen. Binnen QMT zet het IoP in op versterking van de thema's quantuminformatie en -computing (via de samenwerking met KdVI, ILLC en CWI in QuSoft) en quantummaterie. Binnen het focusgebied CSF wil het IoP computational design van slimme materialen stimuleren, waarmee ook productie- en transportprocessen duurzamer kunnen worden gemaakt (in samenwerking met zowel FNWI intern als met AMOLF en industriële partijen). Met deze investeringen verstevigt het IoP zijn internationale topositie. Tevens beoogt het IoP de samenwerking zowel binnen de FNWI als met externe (industriële) partijen te versterken. IoP zet in op slimmere methoden en *machine learning* technieken in data-analyse, simulaties, en *computational design*.

#### **A.6.3 Toekomstvisie van de Universiteit van Amsterdam voor de scheikunde**

Het Van 't Hoff Institute for Molecular Science (HIMS) van de UvA richt zich op onderwijs en onderzoek naar het gedrag van moleculen in steeds complexere processen en systemen. HIMS is georganiseerd in de vier sterke thema's: Analytische, Computationale en Duurzame chemie en Moleculaire fotonica. De ontwikkeling van een duurzame chemie is van groot belang voor de samenleving en dit is één van de onderzoekszwaartepunten van HIMS en van de UvA. Nieuwe, schone en efficiënte processen worden onderzocht met nadruk op katalyse. Daarnaast zijn de beide Amsterdamse universiteiten zowel voor wat betreft onderzoek als onderwijs sterk geprofileerd in twee samenbindende thema's, die het gehele terrein van de chemie bestrijken. Op het gebied van de analytische chemie bestaat een unieke landelijke masteropleiding, die veel studenten trekt. Het brede thema *computer-aided chemistry* werkt toe naar een even toonaangevende masteropleiding, waarin HIMS samenwerkt met de *computational-science* en kunstmatige intelligentiegroepen van het Instituut voor Informatica. Hiermee spelen we in op de enorme vorderingen op het gebied van met name kunstmatige intelligentie in deze eeuw. HIMS zal zich in onderlinge samenhang versterken op deze gebieden. *Computer-aided chemistry* genereert nieuwe fundamentele inzichten en kan ertoe leiden dat revolutionaire methodes worden ontwikkeld om betere syntheseroutes en katalysatoren te ontdekken, om betere materialen en analytische methoden te ontwikkelen en om de interpretatie van spectroscopische gegevens te ondersteunen. De *state-of-the-art* karakterisering van katalysatoren en het volgen van processen sluiten aan bij de analytische chemie en zullen het onderwijs op dit gebied verbreden.

#### **A.6.4 Toekomstvisie van de Universiteit van Amsterdam voor de wiskunde**

In het kader van het Deltaplan voor de Nederlandse Wiskunde heeft op landelijk niveau afstemming plaatsgevonden over de besteding van de sectorplanmiddelen. Passend bij het profiel en de ambities van het Korteweg-de Vries Instituut (KdVI) en de FNWI wil het KdVI investeren in posities op raakvlakken van de wiskunde met artificiële intelligentie (AI), met quantuminformatie (QI), en in posities die bijdragen aan het fundamentele onderzoek in onderling sterk gerelateerde domeinen binnen de algebra, meetkunde en discrete wiskunde, passend bij de huidige oriëntatie van het instituut. De huidige bezetting van het KdVI vormt een bijzonder geschikte basis voor deze ambities. Het KdVI participeert met het Institute of Physics (IoP) in het UvA onderzoekszwaartepunt Quantum Matter & Quantum Information (QMQI) en samen met het IoP, het interdisciplinaire Institute for Logic, Language and Computation (ILLC) en het NWO-Centrum voor Wiskunde en Informatica (CWI) in het onderzoekscentrum QuSoft. De bijdragen van het KdVI aan dit

onderzoek zijn ingebed in het florerende onderzoeksprogramma Algebra, Meetkunde en Mathematische Fysica. Het Zwaartekrachtprogramma NETWORKS, waarvan het KdVI penvoerend is, draagt ook in belangrijke mate bij aan het KdVI onderzoek in QI en aan het onderzoek in discrete wiskunde. De statistiekgroep heeft al projecten gericht op *deep learning*, maar verdere investering is nodig om te kunnen inspelen op de revolutionaire ontwikkelingen in data science en AI, mede in het kader van het door het Instituut voor Informatica (IvI) opgezette landelijke Innovation Center for Artificial Intelligence (ICAI). Met deze versterkingen beoogt het KdVI bestaande sterke onderzoeksgroepen naar een internationale toppositie te brengen. Het KdVI wil dit bereiken door enerzijds te investeren in versterking van de interdisciplinaire samenwerking op facultaire onderzoeksprioriteiten, zoals AI en QI, en anderzijds door extra te investeren in aangrenzend disciplinair onderzoek dat op dit ogenblik al internationaal hoog aangeschreven staat. De QI-positie zal bovendien dienen als een verdere versterking van de band met het ILLC.

## **A.7. Universiteit Maastricht**

Sinds de beslissing in 2009 om de Universiteit Maastricht (UM) op het gebied van de natuurwetenschappen te versterken, is een waaier aan nieuwe onderzoeksinstituten, opleidingen en initiatieven ontwikkeld. Om deze groei te faciliteren heeft de UM op 1 mei 2018 een van haar zes faculteiten hernoemd tot Faculty of Science and Engineering (FSE). Deze faculteit verenigt veel van de bestaande, nieuwe en nog te ontwikkelen bèta en techniek initiatieven. Andere relevante faculteiten zijn Faculty of Health, Medicine and Life Sciences (FHML), School of Business and Economics (SBE) en Faculty of Psychology and Neuroscience (FPN). Het Maastrichtse bèta- en techniekonderwijs en onderzoek wordt gekarakteriseerd door een sterke interdisciplinariteit. Hierbij is vooral de nauwe regionale samenwerking met industrie, MKB, onderwijsinstellingen en overheid uniek. Deze samenwerking concentreert zich op vier Limburgse campussen: Brightlands Chemelot Campus (circulaire chemie en materialen), Brightlands Smart Services Campus (informatica en data science), Brightlands Maastricht Health Campus (biochemie, natuurkunde en medische technologie) en Brightlands Campus Greenport Venlo (biotechnologie). Het onderwijs wordt gekarakteriseerd door de integrale inzet van Problem Based Learning en Research Based Learning. De snelgroeijende Engelstalige bacheloropleidingen Maastricht Science Programme (scheikunde, biologie, natuurkunde), gebaseerd op de traditie van de Liberal Arts and Sciences, en de bachelor Data Science and Knowledge Engineering (wiskunde, informatica), zijn uitzonderlijk en kenmerken zich door een sterk internationaal karakter en grote diversiteit. FSE groeit snel en heeft de afgelopen jaren een aantal nieuwe faciliteiten in gebruik genomen om dit te accommoderen. Bovendien heeft de UM vergevorderde plannen voor nieuwbouw en verbouw om de beschikbare ruimte voor onderwijs en onderzoek in de natuurwetenschappen en technologie meer dan te verdubbelen. Groei van zowel opleidingsaanbod als onderzoek richt zich met name op circulaire chemie en technologie, biotechnologie, natuurkunde, systeembio, data science (DS), artificial intelligence (AI) en medische technologie.

### **A.7.1 Toekomstvisie van de Universiteit Maastricht voor de informatica**

Het informaticaonderzoek is geconcentreerd in het Department of Data Science and Knowledge Engineering (DKE) en het Institute of Data Science (IDS). DKE richt zich op het ontwikkelen van methodes, technieken en algoritmes voor AI en DS. Het AI-onderzoek omvat agenttechnologie, cognitieve robotica, intelligente zoektechnieken, redeneertechnieken, gaming en mens-machine interactie. Op het snijvlak van DS en AI worden technieken ontwikkeld voor *machine learning* (*deep learning*) en tekst- en *data mining*. Daarnaast is er aandacht voor datamodellering (semantic web, ontologieën), dataverwerking, signaalanalyse en cyber security. DKE is actief binnen het ICT-onderzoek Platform Nederland (IPN) en de landelijke onderzoeksschool SIKS. IDS is initiator van samenwerkingsinitiatieven die de grenzen verleggen van de manier waarop DS kan worden toegepast om grote maatschappelijke problemen aan te pakken. De onderzoeksthema's van IDS zijn het gebruik van DS voor het versnellen van wetenschappelijke ontdekkingen, het versterken van gemeenschappen en het verbeteren van gezondheidszorg en welzijn. Zowel IDS als DKE werken samen met IT-stakeholders op de Brightlands Smart Services Campus en deze nauwe samenwerking wordt in de komende periode versterkt. De UM wil, op basis van haar AI-expertise, investeren in 'Explainable AI'. Met het snel toenemende belang van AI voor de maatschappij en economie



wordt 'verklaarbaarheid' een harde eis. De UM wil bovendien het onderzoek naar optimalisering en besliskunde met Big Data versterken. Hierdoor wordt bestaande expertise in optimalisering verbonden met die in de AI en *machine learning* en voorziet in een groeiende behoefte naar technieken om over grote dynamische datasets efficiënt te kunnen optimaliseren. Tenslotte is de versterking van de informatica van groot belang voor het snelgroeiende onderwijs. Hierbij gaat het zowel om de bestaande opleidingen (bachelor Data Science and Knowledge Engineering en twee masters Artificial Intelligence en Data Science for Decision Making) als om nieuwe engineeringopleidingen die de komende jaren starten.

#### **A.7.2 Toekomstvisie van de Universiteit Maastricht voor de natuurkunde**

Het Maastrichtse natuurkundeonderzoek en -onderwijs heeft een aantal sterktes. Binnen de bacheloropleiding Maastricht Science Programme is een volwaardig pakket aan natuurkundemodules beschikbaar. Een groeiend onderzoeksgebied richt zich in samenwerking met Nikhef op zwaartekrachtsgolven en deeltjesfysica. Veel van het overige natuurkundeonderzoek heeft een sterk accent op de klinische fysica en de neurofysica. Het meten en gebruiken van fysische parameters en transportverschijnselen in de mens voor diagnostiek (patiënt monitoring) vindt plaats in een translationele setting. Beeldvormende technieken vormen hierbij de basis voor fundamenteel fysisch onderzoek. Het heeft een innovatieimpuls gegeven aan ontwikkeling in de fysische instrumentatie, met name in de massaspectrometrie, MRI, laserfysica en elektronenmicroscopie. Met M4I is de UM op het gebied van de moleculaire beeldvorming een onderdeel van de nationale grootschalige wetenschappelijke infrastructuur. Qua onderwijs wordt bijgedragen aan een nieuw te ontwikkelen master moleculaire analytische wetenschappen en imaging, waarbij fysische basisconcepten voor instrumentatieontwikkelingen, zoals vacuümtechniek, stromingsleer, meet- en regeltechniek en sensoriek onderwezen en toegepast gaan worden. Tegelijkertijd zal het bacheloronderwijs in de natuurkunde bij het Maastricht Science Programme versterkt worden en in de te ontwikkelen bachelor Circular Engineering. Het Institute for Gravitational Research zal worden uitgebouwd met een pilotfaciliteit. Dit laatste vindt in nauwe samenwerking plaats met Nikhef, de Provincie Limburg, de RUN en een consortium van internationale universiteiten. Een tweede focus is de verdere uitbouw van het gebied van *precision measurement & fabrication*. Dit betreft enerzijds sensoriek en regeltechniek en anderzijds imaging. In deze context is er een duidelijke relatie met 'Natuurkunde van Leven' waarbij in samenwerking met het MUMC+ het natuurkundige perspectief nog sterker zal worden neergezet.

#### **A.7.3 Toekomstvisie van de Universiteit Maastricht voor de scheikunde**

Het scheikundige onderzoek is geconcentreerd in twee brede domeinen. Op de Brightlands Chemelot Campus vindt onderzoek plaats in organische scheikunde, polymere materialen, chemische technologie, sensoren en circulariteit. Het onderzoek is grotendeels geconcentreerd in AMIBM (Aachen Maastricht Institute of Biobased Materials; samenwerking UM, RWTH Aachen, Fraunhofer IME) en het Chemelot Institute for Science & Technology (samenwerking UM, TUE, DSM). Daarnaast is er samenwerking met mbo en hbo binnen het Center of Expertise CHILL. Op de Brightlands Maastricht Health Campus, met een traditionele achtergrond in medische chemie en farmacochemie, zijn met name analytische chemie, chemische biologie en biomateriaalkunde versterkt door de oprichting van MERLN (Institute for Technology-Inspired Regenerative Medicine) en M4I (Maastricht MultiModal Molecular Imaging Institute). Hierbij is er overlap met de domeinen complexe chemische systemen en materiaal-biologie interacties. Scheikundeonderwijs is een integraal onderdeel van deze ontwikkeling en vindt plaats binnen de bachelor Maastricht Science Programme, de master Biobased Materials en de bachelor/master Biomedical Sciences. In de komende jaren zal versterking plaatsvinden van de duurzame chemie en technologie. Hiertoe zullen nieuwe onderzoeksprogramma's en opleidingen worden ontwikkeld, dit in nauwe samenwerking met stakeholders op de Brightlands Campussen en de provincie Limburg. Belangrijke thema's zijn *circular engineering*, duurzame chemie, recycling, flow chemie, biokatalyse en miniaturisatie. Ook de fysische chemie zal worden uitgebreid voor de versterking van de bestaande onderwijsprogramma's in de natuurwetenschappen en als basis voor verdere groei met nieuwe programma's in de engineering. Voorts worden de synthetische biologie, gecombineerd met geavanceerde analytische technieken en de chemische biologie, ondersteund door hoogwaardige MS, EM en NMR infrastructuur (met name de integratie van deze systemen), uitgebouwd. Hierbij wordt ook de farmaco- of medicinale chemie, in samenwerking met de

RUN, versterkt. Ten slotte zal UM de analytische chemie verder ontwikkelen, met aandacht voor de ontwikkeling en het toepassen van zowel geavanceerde instrumenten als sensoriek.

## A.8. Universiteit Twente

Het voor het sectorplan Bèta relevante onderwijs en onderzoek aan de Universiteit Twente (UT) vindt primair plaats in de faculteiten Technische Natuurwetenschappen (TNW) en Elektrotechniek, Wiskunde en Informatica (EWI). De interfacultaire instituten MESA+ voor Nanotechnologie, het TechMed Centre voor gezondheidgerelateerd onderzoek en het Digital Society Institute spelen daarbij een belangrijke rol in het entameren van multidisciplinaire onderzoekssamenwerkingen en het opzetten van omvangrijke publiek-private samenwerkingsverbanden. UT laat zich inspireren door de UN Sustainable Development Goals, met speciale focus op gezondheid, energie en duurzaamheid, schoon water en veiligheid. Er is op veel terreinen uitstekende aansluiting bij de NWA. Erkende sterktes in het Twentse bètaonderzoek betreffen onder andere de Vloeistoffysica, met het Max-Planck Institute for Complex Fluid Dynamics; Fotonica, met de UT als een van de voortrekkers van het nationale Photondelta initiatief; Nanotechnologie, met MESA+ als penvoerder van NanoNextNL en NanoLabNL. De UT is daarnaast toonaangevend op het gebied van software en security met als opkomende sterkte de data science. Dit onderzoek schraagt de internationaal erkende sterktes *robotica, embedded systems, operations research en computational science*. De UT is actief in de Zwaartekrachtprogramma's Multiscale Catalysis (MCEC) en Organs-on-a-Chip (NOCI). Er zijn vele spin-offbedrijven en samenwerkingsverbanden met de industrie. Een vermeldenswaardige recente ontwikkeling in de regio is de geplande onderzoekscampus van Lithium Werks, gericht op batterijtechnologie en digitaal energiemangement. Deze gebieden sluiten nauw aan bij het onderzoeksprofiel en bij de versterkingen die UT via het sectorplan wil realiseren. Relevant voor het sectorplan Bèta zijn de disciplinaire onderwijsprogramma's Applied Physics, Chemical Science & Engineering, Technical Computer Science en Applied Mathematics, en de meer multidisciplinaire opleidingen Advanced Technology, Creative Technology, Biomedical Engineering en Nanotechnology. De instroom in deze opleidingen neemt toe en deze groeizal zich naar verwachting de komende jaren voortzetten. Daarnaast zijn er duidelijke ambities om het aandeel vrouwelijke studenten en staf te versterken.

### A.8.1 Toekomstvisie van de Universiteit Twente voor de informatica

Het informaticaonderzoek op de UT bestaat uit de onderzoekclusters Cyber-Physical-Systems (CPS) en Cyber-Social-Systems (CSS), die voortbouwen op het kerncluster Software-Data-Security (SDS). Kenmerken van kwaliteit zijn een vijftal toekenningen in de NWO Vernieuwingsimpuls en het ERC-programma, en de beste beoordeling in de meest recente onderzoeksvisitatie. Om computersystemen niet alleen toenemend intelligent te maken maar ook naadloos te laten integreren in de fysieke en sociale context van het gebruik, is de keuze gemaakt om vanuit de fundamentele SDS-kern geïntegreerde (fysieke en sociale) systemen te onderzoeken. Fundamentele vragen voor SDS zullen daarom enerzijds gaan over het verkrijgen van robuuste, betrouwbare software, en anderzijds over de verwerking van grote datastromen in *real time*. De toepassing van geavanceerde technieken uit de artificiële intelligentie en machinaal leren spelen hier een belangrijke rol. CSS onderzoekt de interactie tussen machines en de mens, en combineert kunstmatige intelligentie, sensoren en actuatoren voor het ontwikkelen van cybersociale systemen. Adaptiviteit van deze systemen is essentieel en leidt tot de fundamentele vraag hoe we automatisch de fysieke en sociale omgeving correct kunnen interpreteren terwijl deze omgeving door datzelfde systeem beïnvloed wordt. Bij CPS gaat het over het geïntegreerd ontwerpen van computersystemen in interactie met hun fysieke omgeving. De wetenschappelijke uitdagingen liggen hier vooral in het vinden van de technieken die leiden tot een afgewogen balans tussen niet-functionele eisen, waarbij rekenschap gegeven moet worden van veranderende en dikwijls onvoorziene externe invloeden. De huidige keuze voor de clusters SDS, CSS en CPS vormt verbindingen waarin de combinaties van wetenschappelijke expertises tot nieuwe, essentiële en fundamentele inzichten in de informatica zullen leiden. De bestuurlijke uitdaging is het faciliteren van deze verbindingen en tegelijkertijd zorg te dragen voor de alsmaar stijgende opleidingsvraag. Het uitblijven van daadwerkelijke investeringen in het fundamentele systeemonderzoek van elke cluster leidt onherroepelijk tot verschraling van het onderzoek en ook van het onderwijs.

### A.8.2 Toekomstvisie van de Universiteit Twente voor de natuurkunde

Het natuurkundig onderzoek in Twente is geconcentreerd binnen de clusters Physics of Fluids, Applied Nanophotonics, Soft Matter, Energy Materials and Systems en Nanoelectronic Materials and Thin Films. Daarnaast is er sterke participatie in het multidisciplinaire cluster Medical Imaging and Diagnostics. Kenmerken voor kwaliteit zijn het Max-Planck Center voor Complex Fluid Dynamics, 2 ERC Advanced Grants, 9 VICI's, en 29 overige VENI, VIDI en ERC grants. De recente onderzoeksvisitatie (2018) leidde tot de hoogst mogelijke beoordeling. Daarnaast is er hoge waardering voor het onderwijs, onder andere met consistente Topopleiding-predicaten in de Keuzegids en excellente visitatiescores. Studentenaantallen en het aandeel van vrouwen onder studenten groeien beide, met verdere scherpe ambities naar 2024. Om deze beoogde groei met behoud van de hoge kwaliteit te accommoderen is versterking van de staf noodzakelijk. Recent is al een aanzienlijk aantal *tenure track Assistant Professors* aangetrokken vanuit aansprekende instellingen als Caltech, Univ. Melbourne, ETH Zürich en EPFL Lausanne, met name in de vloeistoffysica en de optica. Omvangrijke samenwerkingen bestaan er onder andere met ASML (optica, materiaalkunde en vloeistoffysica), Lionix (geïntegreerde fotonica) en met Océ (3D-printing). De UT heeft verder een unieke expertise op het gebied van Toegepaste Supergeleiding, waarin sterk wordt samengewerkt met internationale instellingen als CERN en ITER. Een onderwerp dat via het sectorplan zal worden versterkt zijn (quantum)-materialen en concepten voor energiezuinige elektronica ('Green-ICT'). Het onderzoek hierin wordt mede geïnspireerd door de energie-efficiëntie van de hersenen en is in Twente gebundeld in het BRAINS Center (Brain-inspired nano-systems). Met Nijmegen en Groningen is op dit gebied het 'Bits and Brains' samenwerkingsverband opgezet. Verder liggen er duidelijke kansen op het gebied van zachte en responsieve (bio)materialen (NWA route Materials – made in Holland), in natuurkundige innovaties voor medische beeldvorming, in fotonische quantumtechnologieën voor veilige communicatie en in het consolideren en uitbouwen van het Max-Planck Center voor Complex Fluid Dynamics.

### A.8.3 Toekomstvisie van de Universiteit Twente voor de scheikunde

Het UT-onderzoek in de scheikunde is gefocuseerd binnen de clusters Process and Catalysis Engineering, Membrane Science and Technology, en Organic, Supramolecular and Polymer Chemistry. Daarnaast is er nauwe betrokkenheid bij de disciplineoverstijgende clusters Bioengineering Technologies en Nanoelectronic Materials and Thin Films. Deze clusters bieden de benodigde focus en massa en vormen een vruchtbare inbedding voor nieuwe onderzoeksgroepen en *tenure trackers*. Kenmerken voor kwaliteit binnen de scheikundediscipline zijn 2 ERC Advanced Grants, 4 VICI's, 4 KNCV Gouden Medaille laureaten en 29 overige VENI-VIDI en ERC grants. Het onderwijs wordt consequent hoog gewaardeerd in visitaties en studentbeoordelingen. Mede vanwege de energie- en grondstoftransitie zal versterkt worden ingezet op batterijtechnologie en elektrochemische conversie, alsmede op *sustainable process engineering*, alle binnen een groter kader van 'Green Chemistry'. Aansluitend bij de sterkte van de nanotechnologie in Twente zullen daarbij nanogestructureerde elektrochemische systemen een belangrijke onderzoeksfocus zijn. Naast een bijdrage aan nieuwe conversieprocessen zal de procestechnologie de stap mogelijk maken naar een algehele verduurzaming van de industrie via efficiëntere scheidingsmethoden, betere (warmte)integratie en intensivering. Een aansprekende uitdaging is de ontwikkeling van Negative Emission Technologies, om het CO<sub>2</sub>-gehalte in de atmosfeer te reduceren. UT scheikunde zal zich tevens versterken op het terrein van hybride materialen voor opto-elektronische toepassingen, en daarmee ook de verbinding tussen nano-materiaalkunde en (geïntegreerde) fotonica. Vanwege de vele ontwikkelingen bij toepassingen van polymeren in bijvoorbeeld vliegtuigbouw, membraantechnologie en biomedische applicaties, zal ook het onderzoek aan deze materialen versterkt worden. Een verder belangrijk aandachtsgebied is moleculaire sensing, binnen het UT-speerpunt Sensing en in relatie tot internationale ontwikkelingen, zoals Internet of Things en Digital Health. Op alle genoemde onderwerpen heeft de UT een grote internationale reputatie. Daarnaast is er een duidelijke groei voorzien in het aantal studenten, mede vanwege een toenemende internationale instroom. Beide zullen met de voorgestelde investeringen worden ondersteund en verder uitgebouwd.

#### **A.8.4 Toekomstvisie van de Universiteit Twente voor de wiskunde**

De kracht van de wiskunde op de UT is geconcentreerd rond de thema's Operations Research (OR), Computational Science (CS) en Data Science (DS). De UT is sterk in wiskundige fundamenteën zoals toegepaste kansrekening, algoritme, speltheorie, optimalisatie, numerieke wiskunde, toegepaste analyse en statistiek. Vanuit toepassingsgebieden zijn er speerpunten in de logistiek van de zorg, smart-gridtechnologie, netwerken, neuroscience, medische beeldvorming, optica en seismiek. Binnen de nationale onderzoeksagenda is er vooral aansluiting bij de thema's Optimalisatie & Onzekerheidskwantificatie, Netwerken, Statistisch Leren en Dynamische Data. De hoge kwaliteit en internationale impact in de toepassingsgebieden blijkt bijvoorbeeld uit een grote omvang van externe financiering, zoals binnen het multidisciplinaire onderzoekcentrum CHOIR (Center for Healthcare Operations Improvement and Research), in Computational Science (14 beurzen via STW, NWO en FOM sinds 2010), en op het gebied van *smart grids* en energienetwerken (twaalf posities met funding van STW, NWO, en andere instanties sinds 2010). De energietransitie vraagt om nieuwe methoden voor optimalisatie onder onzekerheid, marktmodellen en besturingssystemen voor netwerken van decentrale systemen. Dit leidt tot behoefte aan versterking op het snijvlak van mathematische optimalisatie, onzekerheid, decentralisatie en netwerken. Daarom is het voornemen om OR te versterken op het gebied waar optimalisatie en data science elkaar raken. In de gezondheidszorg is de beschikbaarheid van data een uitdaging en een kans voor een nieuwe, *data-driven* aanpak. De CS zal worden versterkt om de brug te kunnen slaan tussen klassieke analytische methoden en moderne statistiek. Het 4TU Precision Medicine programma is een eerste aanzet om de samenwerking tussen CS en de roboticagroepen concreet gestalte te geven. Deze samenwerking heeft de potentie uit te groeien tot een kern waarin wiskunde (variationale methoden), informatica (*computer vision*) en elektrotechniek versmelten tot een krachtige multidisciplinaire eenheid.

#### **A.9. Universiteit Utrecht**

De Faculteit Bètawetenschappen van de Universiteit Utrecht richt zich op fundamenteel onderzoek vanuit het idee dat innovatie voortkomt uit sterke basisdisciplines. Deze basis is in het afgelopen decennium bestendigd met deelname in 5 Zwaartekrachtprogramma's, 4 Spinoza laureaten, 17 ERC's, 9 VICI's en 22 VIDI's voor de hier beschreven disciplines. Het onderzoek richt zich op maatschappelijke uitdagingen in de universitaire thema's *life sciences*, *sustainability* en *complexity*. Binnen deze overkoepelende thema's is de bèta-activiteit versterkt in onder andere Energy & Climate enabling technologies, Biochemical foundations of life, Datascience en Artificial Intelligence. Het bacheloronderwijs kent naast de traditionele disciplines ook Informatiekunde en de Molecular Life Sciences. Het masteronderwijs is georganiseerd in tien programma's. Het Utrecht Science Park vormt de grootste agglomeratie in Europa van onderzoek, bedrijfsleven en UMC. Daarnaast hebben UU en UMCU een strategische alliantie met de TU/e en draagt de Bètafaculteit bij aan vier Nationale Roadmap Onderzoeksfaciliteiten. De afgelopen jaren is door nationale partners en de universiteit sterk geïnvesteerd in katalyse in het CBBC. Er wordt nauw samengewerkt met bedrijven, onderzoeksinstituten en maatschappelijke organisaties waaronder ASML, KPMG, Shell, DTL, ING, NIKHEF, NKI, Hubrecht Instituut, RIVM, de Politie en Jantje Beton. Voorbeelden van samenwerkingen zijn gemeenschappelijke promotieprojecten, onderzoekstages en uitwisseling van staf. De doorstroom van UU afstudeerders en promovendi naar de maatschappij is groot. Het sectorplan biedt een goede kans een noodzakelijke impuls in het onderzoek en de impact ervan te realiseren én bij te dragen aan het ambitieuze onderwijs. Met een breed en interdisciplinair curriculum gebaseerd op state-of-the-art onderzoek kan een grotere groep geïnteresseerde studenten worden bereikt en op termijn een bijdrage worden geleverd aan de nu krappe arbeidsmarkt. De UU ambities in het onderwijs blijken uit de voortdurende innovatie in het educatieve landschap met onder andere meer digitale classrooms, gevarieerde didactische methoden en curricula en interdisciplinaire opleidingen (in ontwikkeling). Het Freudenthal Instituut levert hier als Nederlands grootste onderzoeksinstituut in onderwijsonderzoek een belangrijke bijdrage.

##### **A.9.1 Toekomstvisie van de Universiteit Utrecht voor de informatica**

Het departement Informatica heeft als missie het doen van sterk en fundamenteel informaticaonderzoek, met oog voor toepasbaarheid, en het opleiden van studenten in de informatica, informatiekunde en de AI.

Het onderzoek steunt op drie fundamenteën: Algorithms, Intelligent Software Systems, en Interaction. Het departement heeft in 2017 toekomstplannen voor zowel onderzoek als onderwijs opgesteld. Het fundamentele onderzoek en de toepassingen daarvan vinden hun plek in brede onderzoeksfocusgebieden rondom Data Science, AI, Game Technology, Technology in Education, en Algorithms and Complex Systems. Hiermee wordt ook ingezet op nieuwe samenwerkingen met (inter)nationale bedrijven en publieke instellingen. Het onderwijspalet wordt uitgebreid met masterprogramma's rondom Data Science en Human Computer Interaction, en het AI-programma wordt vernieuwd. Informatica aan de UU is de afgelopen jaren snel gegroeid. Vanuit de faculteit is een groei met ongeveer vijftien fte's in de vaste staf gefaciliteerd voor de jaren 2018 en 2019. Om het onderzoek van de al geworven nieuwe hoogleraren, op de gebieden Data Science (Big Data Management, Visual Data Analytics) en AI (Intelligent Systems, Social AI, en Natural Language Processing) te ondersteunen zullen nieuwe universitaire docenten worden aangesteld. Hiermee verdiept Informatica de expertise en versterkt de nationale focusgebieden Data modelleren & analyseren en Machinaal redeneren & interactie. Daarnaast zal ook het fundament in de hierboven genoemde drie gebieden verder worden versterkt en krijgen de nationale focusgebieden Algoritmiek en Software een impuls. Met de groei van vaste staf kan de groei van het aantal studenten geacommodeerd worden, met behoud van de kwaliteit van het onderwijs. Tenslotte doet Informatica een gerichte investering in de lerarenopleiding en het eigen onderwijs op het gebied van onderzoek naar Computer Science Education.

#### **A.9.2 Toekomstvisie van de Universiteit Utrecht voor de natuurkunde**

Het onderzoek in het departement Natuurkunde vindt plaats in het Debye Institute for Nanomaterials Science (DINS), het Institute for Marine and Atmospheric Research Utrecht (IMAU), het Institute for Theoretical Physics (ITF), en het Institute for Subatomic Physics (SAP). UU wil bijdragen aan het nationale focusgebied Particle & gravitational physics door een een Institute for Subatomic and Gravitational Physics op te richten, dat complementair is aan de al bestaande onderzoeksgroepen in onder andere RU, UvA, Nikhef en CERN. Met een nieuw onderzoeksprogramma over zwaartekrachtsgolven, neutronensterren en het quarkgluonplasma, en de theorie van zwarte gaten zet UU op unieke wijze in op dit thema, dat bovendien ook een sterk wervend effect zal hebben op instroom van studenten. In de nationale focusgebieden 'Quantum materials & technology' en 'Complex systems, soft matter & fluids' zet UU Natuurkunde in op zowel vernieuwende nanogestructureerde materialen met een breed scala aan nieuwe elektronische en optische eigenschappen, als op bio-geïnspireerde materialen. Het verhogen van onderzoekscapaciteit op dit gebied zal effectief zijn door de uitstekende Utrechtse infrastructuur en het aanwezige fundament in theoretisch onderzoek en computersimulaties. Dit onderzoek draagt bij aan het maatschappelijk thema duurzaamheid en zal ook een nieuwe impuls geven aan het Utrechtse biofysicaonderzoek en -onderwijs. Het onderzoek binnen het IMAU kent vele maatschappelijk relevante toepassingen en er is samenwerking met het KNMI, het CCSS, en het Energy and Sustainability Institute in Groningen. Door in te zetten op de werking en dynamica van het klimaatstelsel versterkt UU het nationale natuurkundefocusgebied Energy & Sustainability. Deze gerichte investeringen in het verlengde van het fundament bieden een goede kans om meer bachelor- en masterstudenten en promovendi op te leiden. Bij het werven van nieuwe wetenschappelijke staf zal het Westerdijk-fellow-instrument worden ingezet om het aandeel van de vrouwelijke staf te verhogen.

#### **A.9.3 Toekomstvisie van de Universiteit Utrecht voor de scheikunde**

Het onderzoek binnen het departement Scheikunde vindt plaats in het Bijvoet Center for Biomolecular Research en het hierboven reeds genoemde Debye Institute for Nanomaterials Science. Het Bijvoet centrum bestudeert de relatie tussen structuur en functie van biomoleculen, zoals eiwitten en lipiden, die een belangrijke rol spelen in biologische processen, waaronder regulatie, herkenning en interactie. Daarvoor beschikt het instituut over een unieke combinatie van geavanceerde infrastructuur (NMR, X-ray, massaspectrometrie, cryo-EM) en vormt daarmee een prominent onderdeel van het nationale focusgebied Structuurbiologie en de Europese structuurbiologische onderzoeksgemeenschap. De missie van het Debye instituut is het ontwerpen, maken en bestuderen van nanogestructureerde materialen, die ingezet kunnen worden voor een duurzame samenleving. Daarbij is de relatie tussen de atomaire en nanoscale-structuur enerzijds, en de elektronische eigenschappen anderzijds essentieel, en worden chemische synthese,

Newtoniaanse modellering en geavanceerde microscopie en spectroscopie gecombineerd. Speerpunten liggen op het vlak van de katalyse en functionele colloïdale nanostructuren, met veel (inter)nationale academische en industriële samenwerking. Ter versterking van dit onderzoekpalet en het onderwijs wordt een centrum voor Chemical Quantum Simulation beoogd, waarin ab-initio methodes met moleculaire dynamica gecombineerd worden om de vorming en eigenschappen van nanogestructureerde materialen te begrijpen. Dit centrum is complementair aan het Nederlandse onderzoekslandschap en vormt tevens een brug naar de modellering van complexe biomoleculen in het Bijvoet centrum en het onderzoek aan quantummaterialen in het departement Natuurkunde. Daarnaast wil Scheikunde gericht investeren in het Utrechtse Life Sciences onderwijs en onderzoek door de Cellular Structural Biology te versterken. De dynamische organisatie van en interacties in humane cellen en weefsels, en de moleculaire respons van cellen op externe stimuli wordt op een *topdown*-manier bestudeerd. Hiervoor worden onafhankelijke, jonge teams van U(H)D's aangesteld, die bijdragen aan een verdere synergie binnen het Bijvoet centrum en aan zijn intensieve, lokale en (inter)nationale samenwerking met biomedische en farmaceutische instituten en bedrijven.

#### **A.9.4 Toekomstvisie van de Universiteit Utrecht voor de wiskunde**

Het Mathematical Institute (MI) bestaat uit twee samenwerkende onderzoeksgroepen. In Fundamental Mathematics is meetkunde de verbindende discipline in de oprichting van het Utrecht Geometry Center. Dit lokale speerpunt - versterkt door de benoeming van Spinoza-laureaat Moerdijk tot universiteitshoogleraar - is een prominent onderdeel van het nationale profileringsthema Symmetrie en Meetkunde. In Mathematical Modelling zijn toegepaste analyse, stochastiek en numerieke wiskunde de verbindende disciplines bij het integreren van data in modellen om het voorspellend vermogen aanzienlijk te verbeteren. Dit lokale speerpunt - versterkt door het recent opgerichte UU Centre for Complex Systems Studies - is een prominent onderdeel van het nationale profileringsthema Dynamische Data. Deze profilering van het onderzoek maakt het mogelijk het fundamentele onderzoek beter te koppelen aan het oplossen van maatschappelijke vraagstukken, bijvoorbeeld door de ontwikkeling van nieuwe algoritmen en software. Door met een gerichte investering nieuwe UD/UHD (*tenure track*)-posities te realiseren, kan het Mathematical Institute deze twee vernieuwende lokale speerpunten laten uitgroeien tot internationaal zichtbare centra waar jonge talenten de ruimte krijgen zich te ontwikkelen tot leidende onderzoekers. Met deze concentratie van menskracht ontstaat een focus op internationaal toonaangevende speerpunten met een aantrekkelijk en internationaal onderwijs- en PhD-programma en met diverse interdisciplinaire samenwerkingen in het Utrecht Science Park (KNMI, UMCU en RIVM) op het gebied van de levens- en geowetenschappen. Het Mathematical Institute zal de groei van de staf ook gebruiken om de genderbalans te verbeteren, door verder in te zetten op het succesvolle Utrechtse Westerdijk Fellows-programma en vijftig procent van de nieuwe posities specifiek te bestemmen voor vrouwelijke wiskundigen.

#### **A.10. Vrije Universiteit Amsterdam**

De VU Faculteit Bètawetenschappen richt zich in onderwijs en onderzoek op samenwerking tussen disciplines en afdelingen. Alle disciplines hebben speerpunten met internationaal toponderzoek, zoals dynamische systemen en statistische data-analyse (Wiskunde), zwaartekrachtgolven en lasertechnologie (Natuurkunde), farmacochemie en theoretische chemie (Scheikunde), en security en kunstmatige intelligentie (Informatica). Recente SEP-evaluaties bevestigen dit. Het onderwijsportfolio is een mix van mono- en multidisciplinaire opleidingen, in totaal tien bachelors en dertien masters (inclusief *joint degrees* met UvA). Ook biedt de faculteit lerarenopleidingen aan voor wiskunde, scheikunde en natuurkunde (apart of ingedaald in reguliere master). Het facultaire percentage vrouwelijke hoogleraren is 21% (2018). Op de campus bestaat een intensieve samenwerking met het Amsterdam UMC; het profiel van Natuurkunde en Scheikunde sluit hier bij uitstek op aan. De komst van de EMA (European Medicines Agency) naar de Zuidas is ook van strategisch belang. Wiskunde en Informatica werken op de campus samen met andere faculteiten in het Amsterdam Center for Business Analytics (ACBA) en in het Netwerk Instituut. In april 2017 zijn vergevorderde plannen voor gezamenlijke UvA/VU huisvesting van Natuurkunde en Informatica afgeketst. De oorzaken hiervoor lagen niet bij de staf; de samenwerking vindt nu op een andere wijze voortgang. De twee bètafaculteiten werken samen op zowel onderwijsgebied (e.g., *joint degrees*,



Amsterdam University College) als op onderzoeksgebied (bijvoorbeeld ARCNL, Nikhef, Amsterdam Data Science, nieuwe AI-instituut ICAI). Vanaf september 2019 start de faculteit een onderwijssamenwerking met Universiteit Twente om op de VU campus de UT-bachelor Mechanical Engineering aan te bieden. De bedoeling is om zo meer jongeren uit de regio Noord-Holland te interesseren voor een technische opleiding. Alle afdelingen hebben of krijgen nieuwe huisvesting: Scheikunde, samen met groepen van het Amsterdam UMC, in het O|2 lab-gebouw; Wiskunde en Informatica in het NU gebouw (2019, faciliteiten voor *robotics, smart building, networks*), en Natuurkunde (2021, nieuw LaserLab).

#### **A.10.1 Toekomstvisie van de Vrije Universiteit Amsterdam voor de informatica**

De afdeling Informatica speelt een sleutelrol op kerngebieden binnen de informatica in Nederland. De afdeling heeft internationale expertise binnen de deelgebieden Algoritmiek, Computer Netwerken, Kustmatige Intelligentie en Software. Ook binnen meer toepassingsgerichte gebieden, zoals Bioinformatica, Informatiesystemen en Socially-Aware Computing heeft VU Informatica een internationaal zichtbare rol. Samen met het CWI doet de afdeling werk op het gebied van Security en binnen het Zwaartekrachtproject Quantum Software. Binnen ICAI is een intensieve samenwerking met Elsevier gestart. Er zijn tal van contacten met bedrijven vanuit Algoritmiek en Computer Systemen. Informatica heeft 3 NWO Veni, 2 NWO Vidi, 1 NWO TOP, 1 NWO Vici, en 2 ERC Starting grants. Ook heeft Informatica een KNAW-lid en twee *members of Academia Europaea*. Binnen de afdeling zullen de sectorgelden worden ingezet op versterking van drie bestaande onderzoeksgebieden: genetwerkte computersystemen, *machine reasoning & interaction* (binnen het focusgebied Data Science en AI), en security & privacy. Daarnaast zal één nieuw gebied, *data modelling en analysis* (eveneens binnen het focusgebied Data Science en AI) worden ingevuld. Onderzoek op andere gebieden blijft bestaan, maar valt buiten de plannen voor sectorgelden. Het onderzoek binnen alle vier (sector)gebieden staat niet los van elkaar. De sectorgelden zullen worden gebruikt om samenwerking en integratie te bevorderen in cross-over onderzoek binnen kernonderwerpen. Ook zal aansluiting binnen Amsterdam (voornamelijk met de UvA) gezocht worden, vooral binnen de context van het ICAI en VUsec. De VU heeft een sterke groei doorgeemaakt in studentenaantallen binnen de sectordeelgebieden. De sectorgelden zullen bijdragen aan het aanstellen van onderzoekers om de enorme onderwijsbehoefte te kunnen invullen. Met deze wetenschappelijke uitbreiding krijgt de afdeling de mogelijkheid om een nieuwe generatie studenten op te leiden.

#### **A.10.2 Toekomstvisie van de Vrije Universiteit Amsterdam voor de natuurkunde**

De afdeling Natuurkunde heeft een sterke focus op de landelijke focusgebieden Particle and Gravitational Physics, Physics of Life & Health, Energy & Sustainability en Precision measurement & fabrication. Deze focus heeft geleid tot de hoogste score voor onderzoekskwaliteit in de recente SEP-evaluatie en schraagt op groot succes in persoonlijke beursaanvragen (o.a. 7 ERC, 5 VIDI en 4 VICI beurzen sinds 2010). Het onderzoek is ingebed in LaserLaB Amsterdam (nationaal uniek instituut, onderdeel van Laserlab Europe) en de partnerschappen Nikhef en ARCNL. De onderzoekskeuzes worden nauw afgestemd met de UvA. Er zijn sterke banden met AMOLF en Amsterdam UMC. De valorisatieactiviteiten (spin-offs, Demonstrator lab, ARCNL) zijn beoordeeld met de hoogste score voor maatschappelijke relevantie in de SEP-evaluatie en drie NWO-Natuurkunde Valorisatieprijzen. De afdeling is nauw betrokken bij de opleidingen Natuurkunde (met de UvA), en interdisciplinaire opleidingen Medische Natuurwetenschappen (MNW) en Science, Business and Innovation (SBI). De afdeling wil de eerder gekozen focus verder aanscherpen door zich te versterken op het gebied geavanceerde lasermethoden voor precisie metrologie, voor onderzoek in fundamentele fysica en met toepassingen in nanolithografie (ARCNL, ASML). Daarnaast wil VU Natuurkunde de pioniersrol binnen Nederland en Nikhef versterken op het gebied van zwaartekrachtsgolven, met focus op instrumentatie (in connectie met LaserLaB), fenomenologie en data-analyse. De focus op fotonica voor leven en gezondheid zal uitgebreid worden, vanuit de bewezen kracht in het verbinden van fundamenteel onderzoek naar klinische toepassingen en valorisatie via spin-offs, in lijn met de Nationale Agenda Fotonica. Tenslotte streeft Natuurkunde naar het versterken van de focus op het gebied van energie, die voortbouwt op de succesvolle traditie op het gebied van fotosyntheseonderzoek, en de laatste jaren is verbreed naar niet-biologische systemen. Door deze heldere profilering kunnen successen in fundamenteel onderzoek, focus op de grote maatschappelijke vraagstukken en valorisatie versterkt worden. Tegelijkertijd zal dit de onderwijsinspanningen in Natuurkunde, SBI, MNW en Mechanical Engineering ondersteunen.



### A.10.3 Toekomstvisie van de Vrije Universiteit Amsterdam voor de scheikunde

Het eerste sectorplan benoemde de zwaartepunten die belangrijk zijn voor de profilering van Scheikunde VU, namelijk Farmacochemie (medicinale chemie) en de complementaire zwaartepunten analytische chemie, computationele chemie en synthese (het laatste als onderdeel van farmacochemie). De samenwerking met de UvA heeft deze sterke profilering mogelijk gemaakt omdat de Amsterdamse samenwerking plaatsvindt vanuit de fundamentele disciplines waarbij juist de thema's het onderscheidend karakter vormen. De internationaal leidende rol van VU Scheikunde op het gebied van *human health* komt onder andere tot uiting via de veelvuldige participatie en coördinatie in grote onderzoeksprogramma's zoals Innovative Medicines Initiative (IMI) projecten en een significant aantal FP7-projecten. Verder heeft de afdeling 4 NWO Vidi's, 2 NWO Vici's, 4 NWO TOP, 1 NWO Toppunt, 1 NWO CHIPP, 1 NWO COAST, 2 ERC grants en 1 KNAW- lid. Recent heeft de afdeling door het aantrekken van specifieke (jonge) vooraanstaande stafleden de translationele keten weten te verstevigen (bijvoorbeeld toepassing van massaspectrometers in operatiekamers, toxicologische effecten van medicijnen op organen) waarmee de impact van het chemisch onderzoek en onderwijs significant vergroot is. Het percentage vrouwelijke hoogleraren is inmiddels gestegen naar 29%. De nieuwe sectorplannen zullen worden gebruikt om de bestaande zwaartepunten te versterken en nog beter met elkaar te verbinden. Daarbij zullen de nieuwste analytische en biofysische methoden een bijdrage leveren aan beter begrip van chemische, medicinale en toxicologische activiteiten. Vanuit het zwaartepunt computationele chemie zullen *computer-aided design*, AI en *theory-driven experimentation* de link tussen analytische chemie, synthese en medicinale chemie binnen de bestaande translationele keten verstevigen. Daarbij kunnen ook nieuwe methoden en data, die ontwikkeld worden bij Informatica (AI), Natuurkunde (biofysica) en het academische ziekenhuis (*personalized medicines & therapy*), worden opgenomen in chemische studies. Met deze nieuwe kansen en geholpen door de heldere en herkenbare profilering zal de afdeling de (inter-)nationale successen in de toekomst verder kunnen uitbouwen.

### A.10.4 Toekomstvisie van de Vrije Universiteit Amsterdam voor de wiskunde

De Afdeling Wiskunde heeft een lange traditie in het slaan van bruggen tussen fundamenteel wiskundig onderzoek en het ontwikkelen van toepasbare wiskundige technieken. In het afgelopen decennium heeft de afdeling gekozen voor een scherpe profilering langs twee hoofdlijnen: dynamische systemen en stochastiek. De groep dynamische systemen behoort tot de internationale top, met recente toekenningen in de VICI en TOP1 competities. Het onderzoek strekt zich uit van netwerkdynamica tot patroonvorming, en van computerondersteunde bewijstechnieken tot geometrische aanpakken. De twee speerpunten dynamische systemen en stochastiek sluiten naadloos aan bij de landelijke wiskundecusters NDNS+ en STAR, waarin de leden van de afdeling al jaren een vooraanstaande rol spelen. De afdeling levert daarnaast kleinere maar waardevolle bijdragen aan de andere twee clusters DIAMANT en GQT. Binnen de stochastiek is de afdeling toonaangevend op het gebied van statistische data-analyse, van theorie tot (bedrijfs)toepassingen. Naast de opleiding Mathematics verzorgt de afdeling ook de opleiding Business Analytics, de enige academische bedrijfswiskundeopleiding van Nederland (die samen met de reguliere wiskundeopleidingen wordt gevisiteerd). De afdeling is van plan de bestaande profilering krachtig uit te bouwen. Geheel conform de disciplinaire beschrijving onder regie van het Platform Wiskunde, zet de afdeling in op die profileringsthema's die zich op het grensvlak tussen het NDNS+ en STAR cluster bevinden. Daardoor worden de interne verbindingen enerzijds versterkt via de profileringsthema's Statistisch Leren en Dynamische Data (met name *data-driven dynamics* en data-assimilatie). Anderzijds worden de banden met aanpalende gebieden aangehaald binnen de thema's Netwerken (in het bijzonder de analyse van grote datasets gegenereerd door netwerken, connectie DIAMANT) en Geometrische en Stochastische Evolutie (connectie GQT). Deze heldere profilering leidt tot een kwaliteitsimpuls die de internationale uitstraling zal vergroten. Tegelijkertijd zet de afdeling in op verbetering van de genderbalans en versterking van de basis voor het wiskundeonderwijs.

## A.11. Wageningen University

Wageningen University (WUR) verzorgt onderzoek en onderwijs binnen het domein van 'Gezonde Voeding en Leefomgeving', specifiek binnen de disciplines 'Agrotechnology & Food Sciences', 'Animal Sciences', 'Environmental Sciences', 'Plant Sciences' en 'Social Sciences'. Onderwijs en onderzoek worden verzorgd en uitgevoerd door leerstoelgroepen, die zijn ingebed in onderzoeksscholen. Het portfolio van bachelor- en masteropleidingen weerspiegelt die terreinen. De laatste jaren kent de universiteit een sterke verhoging van de studenteninstroom. Sinds 2012 zijn de studentenaantallen verdubbeld. Het onderzoek van WUR wordt gekenmerkt door een integrale benadering, waarbij kennis uit de alfa-, bèta- en gammawetenschappen wordt gecombineerd. Voor dit sectorbeeld ligt de focus vooral op fysica en chemie van complexe materialen, met relevantie voor onder andere voeding en *life sciences*. WUR heeft vanwege haar inhoudelijke focus een unieke positie, en neemt internationaal een sterke wetenschappelijke positie in haar domein in, zoals onder andere blijkt uit verschillende rankings. WUR is wereldwijd de beste universiteit in het domein van Agro & Food. Het onderzoek van WUR wordt zeer goed tot excellent beoordeeld in onderzoeksvisitaties. Onderzoekers verwerven toekenningen van NWO en ERC. Regionaal is de ontwikkeling van Food Valley in Midden-Nederland van belang. Op nationaal niveau zal er de komende jaren nog intensiever worden samengewerkt binnen de 4TU's en specifiek met TU/e. Internationale samenwerkingen kent de faculteit met kennisnetwerken, zoals het A5 netwerk, waarin de vijf wereldwijd leidende universiteiten op het gebied van Agro & Food samenwerken. Wageningen University bestaat uit één faculteit, en kent daarmee geen scheikunde- dan wel natuurkundesubfaculteit. Het onderwijs in de natuur- en scheikunde is verdeeld over meerdere opleidingen. Kenmerkend voor WUR is de geïntegreerde benadering van vraagstukken. Vanuit die benadering zijn leerstoelgroepen bij een groot aantal opleidingen betrokken en zijn opleidingen opgebouwd uit onderwijs dat door verschillende leerstoelgroepen verzorgd wordt.

### A.11.1 Toekomstvisie van de Wageningen University voor de natuurkunde

De fysica aan WUR bestudeert complexe en biologische materialen binnen het kader van de polymeer- en colloïdfysica, voedselphysica en biofysica, met (micro-) spectroscopische technieken die steeds verbeterd en vernieuwd worden. Belangrijke doelstellingen zijn het meten en begrijpen van precieze structuur- en morfologie-eigenschappen, waaronder met name reologische eigenschappen. Een belangrijke uitdaging voor de toekomst is het kwantificeren van microstructureel relaxatiegedrag op snelle tijdschalen van complexe materialen *under flow*. Dit is cruciaal om hun historieafhankelijke niet-evenwichtseigenschappen te begrijpen en gericht te modificeren. In dit gebied zijn chemie en fysica sterk verweven. Uniek voor fysicaonderzoek aan WUR is de relatie met het domein van WUR: leefomgeving, natuurlijke grondstoffen en leefstijl. Onderzoek in de fysica binnen de context van WUR richt zich op complexe en biologische materialen en de fysica van fotosynthese. Investeren in de fysica zal vooral plaatsvinden in Biophysics, Physics and Physical Chemistry of Foods en Physical Chemistry and Soft Matter. WUR-onderzoekers in de fysica werken samen in de onderzoeksscholen VLAG en WIMEK. Samenwerking vindt (inter)universitair plaats, met een groot aantal Nederlandse universiteiten en kennisinstituten. Onderzoekers verwerven toekenningen in de Vernieuwingsimpuls en de ERC. Fysisch onderzoek van WUR wordt bij visitaties zeer goed beoordeeld.

### A.11.2 Toekomstvisie van de Wageningen University voor de scheikunde

Het onderwerp 'complexe materialen' omvat onderzoek naar functionele dan wel katalytische oppervlakken, alsook de ontwikkeling en studie van zachte responsieve materie die met steeds grotere precisie gedefinieerd is. Voor de functionele oppervlakken worden nieuwe organisch-chemische reacties ontwikkeld, samen met nieuwe methodes voor de detectie ervan op oppervlakken. Veel van deze chemie wordt ingezet in de ontwikkeling van *sensing* nanostructuren en *devices* waarin deze zachte materie of de oppervlakken de actieve elementen vormen. Verder maken de studie en de controle tot op nanoschaal het mogelijk dergelijke oppervlakken ook in te zetten voor de conversie van *biobased* materialen. Onderzoek in het focusgebied van dit sectorplan chemie vindt plaats binnen zes leerstoelgroepen en in de onderzoeksschool VLAG. Een significant deel van de Wageningse chemie, ook bekroond met subsidies van NWO en ERC, valt buiten de focusgebieden (bijvoorbeeld atmosferische chemie) of brengt WUR onder binnen het sectorplan biologie (biochemie). WUR zet, gezien het bovenstaande, vooral in op versterking

van Biobased Chemistry and Technology en Organic Chemistry. Binnen de context van WUR richt onderzoek in de *biobased chemistry* zich op het vergroten van het potentieel van *global resources* via de ontwikkeling van efficiënte en duurzame (katalytische) conversieprocessen, producten en kringlopen. Organic Chemistry concentreert zich op het snijpunt van nanotechnologie, chemische biologie en organische synthese. Naast (inter)universitaire samenwerking vindt ook samenwerking plaats met instituten als TNO, RIVM, RIKILT en het NIZO. Het WUR-onderzoek in de chemie krijgt excellente beoordelingen bij internationale onderzoekswisitaties; onderzoekers verwerven regelmatig toekenningen in de Vernieuwingsimpuls of de ERC.

#### **A.11.3 Toekomstvisie van de Wageningen University voor de informatica en wiskunde**

Wiskunde, inclusief statistiek, maar ook informatica zoals bij WUR bestudeerd en onderwezen, worden niet gezien als kernwiskunde dan wel informatica, maar spelen in de Wageningse setting een belangrijke rol in het bèta- en techniekonderzoek. De gigantische toename van data in de sleutelgebieden van het domein vereisen goede wiskundige modellen en informaticaprogramma's. Wiskunde speelt een centrale rol als het gaat om het ontwikkelen van nieuwe methodologie voor het analyseren van grote datasets en daarin is Wageningen gespecialiseerd. Het WUR-onderzoek in de wiskunde wordt bij onderzoekswisitaties 'zeer goed' tot 'uitstekend' beoordeeld. Samenwerking vindt plaats met de UvA en LEI in de masteropleiding Statistiek. Ook met de TUD en de UT bestaan samenwerkingsrelaties. Voor de informatica geldt dat het integreren en modelleren op basis van de daaruit verkregen informatie met behulp van *artificial intelligence* en *machine learning* van belang zijn voor onderzoek binnen de bèta en techniek, vooral met het oog op de *data science*, zoals dat in Wageningen plaatsvindt. Samenwerking vindt vooral plaats met de overige technische universiteiten.