
SECTORBEELDEN BÈTAWETENSCHAPPEN 2020



**VOOR EEN STERKER
FUNDAMENT**

AARD- EN MILIEUWETENSCHAPPEN

ASTRONOMIE

BIOLOGIE

FARMACEUTISCHE WETENSCHAPPEN

SECTORBEELDEN BÈTAWETENSCHAPPEN 2020

VOOR EEN STERKER FUNDAMENT

AARD- EN MILIEUWETENSCHAPPEN

ASTRONOMIE

BIOLOGIE

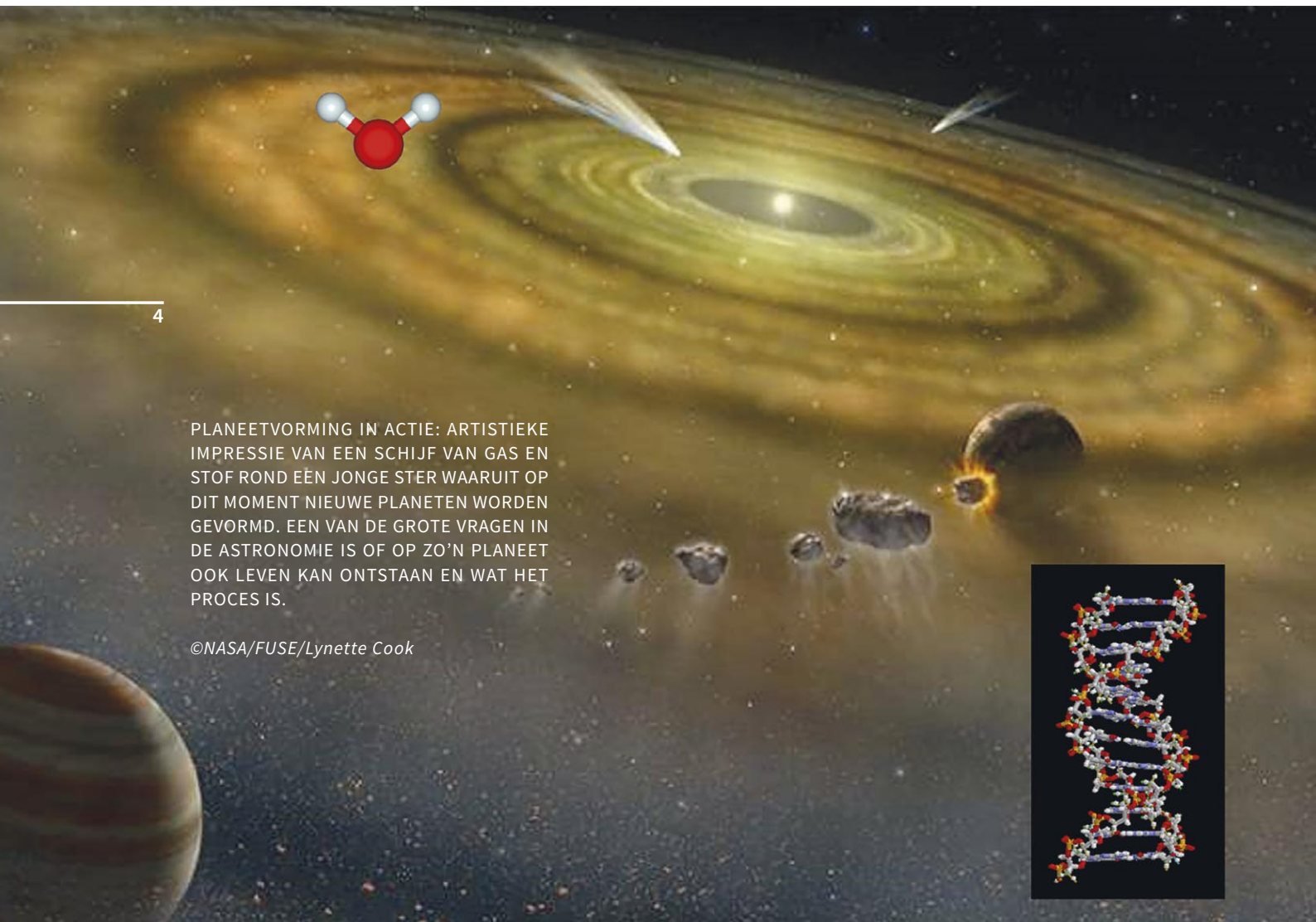
FARMACEUTISCHE WETENSCHAPPEN

INHOUD

INTRODUCTIE	5
AARD- EN MILIEUWETENSCHAPPEN	11
ASTRONOMIE	53
BIOLOGIE	79
FARMACEUTISCHE WETENSCHAPPEN	133



OCEANEN HEBBEN ZO'N 30% VAN DE CO₂ OPGENOMEN DIE DE MENS GEPRODUCEERD HEEFT. AARD- EN MILIEUWETENSCHAPPERS ONDERZOEKEN HOE WE NOG MEER CO₂ IN OCEANEN KUNNEN OPSLAAN ZODAT KLIMAAT-VERANDERING BEPERKT BLIJFT.



4

PLANEETVORMING IN ACTIE: ARTISTIEKE IMPRESSIE VAN EEN SCHIJF VAN GAS EN STOF ROND EEN JONGE STER WAARUIT OP DIT MOMENT NIEUWE PLANETEN WORDEN GEVORMD. EEN VAN DE GROTE VRAGEN IN DE ASTRONOMIE IS OF OP ZO'N PLANEET OOK LEVEN KAN ONTSTAAN EN WAT HET PROCES IS.

©NASA/FUSE/Lynette Cook

INTRODUCTIE

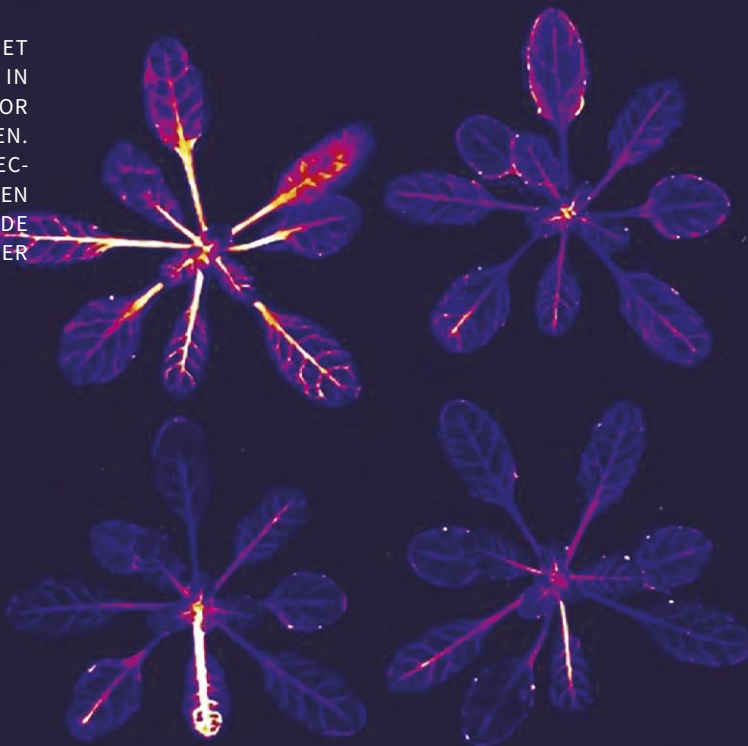
Het document dat u hierbij in handen heeft bevat de Sectorbeelden van vier wetenschappelijke sectoren: Aard- en Milieuwetenschappen, Astronomie, Biologie en Farmaceutische Wetenschappen. Deze sectoren, alle vier bètawetenschappen, zijn in het eerdere Sectorbeeld Bèta¹ reeds genoemd om, na de disciplines Informatica, Natuur-, Schei- en Wiskunde en Techniek, Sectorplannen te gaan ontwikkelen. Zulke Sectorplannen zijn een uiterst succesvol instrument gebleken ter versterking van het fundament van specifieke wetenschappelijke sectoren. Sterk gedreven door de noodzaak om bij te dragen aan het oplossen van belangrijke maatschappelijke en wetenschappelijke vraagstukken, geven de onderhavige Sectorbeelden weer waar onze sectoren zich mee bezig houden, hoe ze georganiseerd zijn, en hoe relevant ze zijn voor onze samenleving. Onze vier sectoren zijn essentieel voor de toekomst gezien de aard en urgentie van de maatschappelijke en wetenschappelijke vraagstukken die door deze sectoren worden aangepakt. Denk bijvoorbeeld aan de bedreigingen die onze samenleving treffen op het gebied van gezondheid, welzijn en veiligheid, aan de noodzaak tot investeren in een verdere verduurzaming van onze economie en welvaart, aan het aantrekken van jong talent voor de bètawetenschappen als investering in onze toekomst, aan de zoektocht naar antwoorden op de grote fundamentele vraagstukken van de 21^e eeuw betreffende onze plaats in het universum, en aan het besef dat we de maximale dragende capaciteit van onze planeet op verschillende punten dreigen te overschrijden (of dat zelfs al doen). Kennis en kunde uit onze sectoren staan, niet alleen via onderzoek, maar ook door het opleiden van de volgende generatie experts, in dienst van de overheid en samenleving bij het aanpakken van deze vraagstukken. De Sectorbeelden laten de noodzaak van verdere investering in het fundament van de sectoren zien om deze uitdagingen het hoofd te bieden. Nederland, en ook de positie van Nederland wereldwijd, wordt hierdoor sterker. De vier sectoren willen hun verantwoordelijkheid nemen en kunnen, met een intensivering van de ondersteuning, een flinke stap naar de toekomst gaan zetten. Hoe dat in zijn werk gaat zal hierna worden uitgelegd.

ZORG VOOR ONZE LEEF-WERELDEN

Hedendaagse nationale en internationale crises en ontwikkelingen tonen aan dat, meer dan ooit tevoren, ons leven, de wereld om ons heen, en de plek van onze kwetsbare aarde in het heelal onze onmiddellijke aandacht verdienen. Onze samenleving staat voor grote opgaves, die we in Nederland en in de hele wereld samen moeten oplossen. Die opgaves, de grote wetenschappelijke en maatschappelijke vraagstukken van de 21^e eeuw, bevatten veel thema's die op het gebied liggen van onze vier sectoren. In het kort zouden we die gezamenlijke thematiek kunnen omschrijven als de 'Zorg voor onze leef-werelden', waarbij het streepje aangeeft dat zowel het leven als de werelden om ons heen (aarde en universum) sleutelbegrippen zijn. Het gaat over de fundamentele

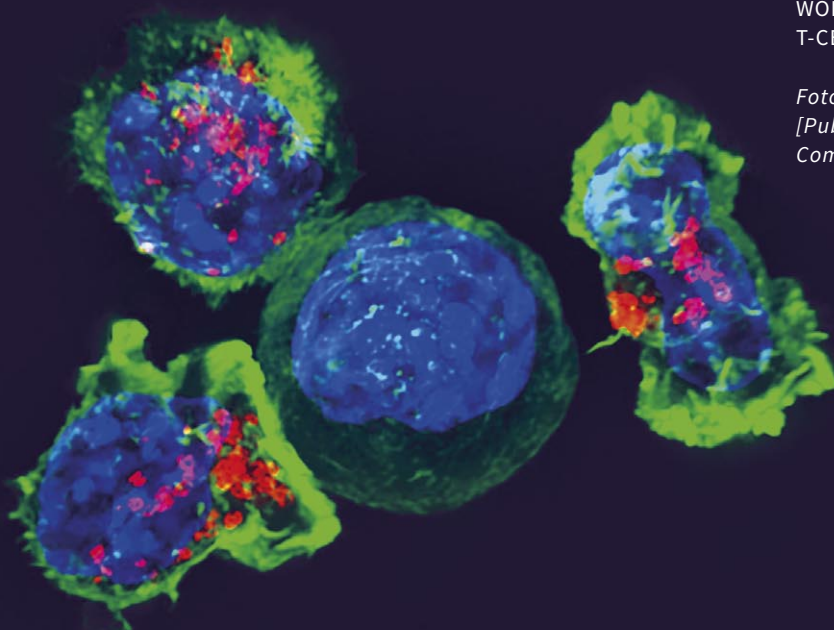
¹ Rapport van de Commissie Meijer (2018), Een nieuw fundament: beeld van de bètasector

DEZE FOTO TOONT DE ACTIVITEIT VAN HET GROEIHORMOON AUXINE (LICHTE KLEUR IN BLADSTELLEN). DIT HORMOON ZORGT ERVOOR DAT PLANTEN NAAR HET LICHT TOEGROEIEN. BIOLOGEN BESTUDEREN O.A. DE ARCHITECTUUR VAN PLANTEN EN KUNNEN DEZE OP EEN DUURZAME MANIER AANPASSEN ZODAT DE OPBRENGST VERGROOT WORDT MET MINDER GEBRUIK VAN WATER EN KUNSTMEST.



FARMACEUTISCHE WETENSCHAPPEN ZIEN ZIEKTE EN GEZONDHEID STEEDS MEER ALS ECOSYSTEMEN, ZOALS HET MICROBIOOM, HET IMMUNSYSTEEM OF EEN TUMOROMGEVING, DIE OP EEN DUURZAME MANIER HERSTELD MOETEN WORDEN. DE AFBEELDING TOONT DRIE T-CELLEN ROND EEN TUMORCEL.

Foto: The National Institutes of Health [Public domain], via Wikimedia Commons.



kennis van de oorsprong, samenstelling, aanpassing en evolutie van deze werelden en het leven daarin, ofwel van de 'menselijke, biologische, aardse en kosmische ecosystemen'. Voorbeelden van kenmerkende en essentiële thema's staan in de Box 'Waarom?'. Het onderzoek en onderwijs binnen onze vier sectoren voorzien in kennis, kunde en opleiding op al deze thema's. Veel van die thema's vallen binnen meerdere van de vier sectoren en overbruggen daarmee de disciplinegrenzen. Daarnaast hebben de vier sectoren natuurlijk ook ieder hun specifieke accenten en sterktes, met bijbehorende maatschappelijke en wetenschappelijke relevantie, en die worden in de voorliggende Sectorbeelden nader aangeduid.

WAAROM?

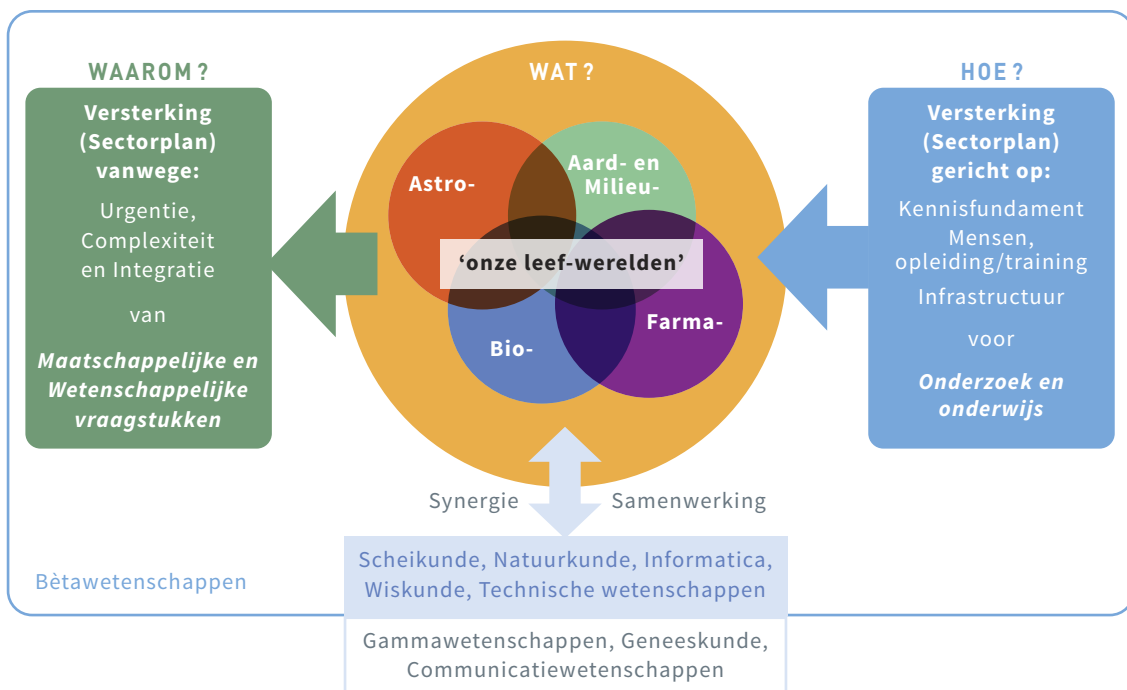
Grote vraagstukken van de 21^e eeuw:

Kwetsbare Aarde ('Pale Blue Dot²'), klimaat, biodiversiteit, samenstelling van het heelal en het leven op andere planeten, bouwstenen, evolutie, veiligheid, leefomgeving, gezondheid en zorg, energie(transitie), water, landbouw, voedselzekerheid, duurzaamheid

In aansluiting op (inter)nationaal beleid:

NWA, KIA/KIC, Sleuteltechnologieën, Missiegedreven Topsectoren- en Innovatiebeleid, *Green Deal*, EU, SDG's

VERSTERKING VAN HET FUNDAMENT EN KENNIS VOOR DE SAMENLEVING: 'ONZE KWETSBARE AARDE'



² Pale Blue Dot: Een treffende aanduiding naar aanleiding van een foto van de Aarde genomen in 1990 door het ruimteschip Voyager 1 vanuit de uiterste regionen van ons zonnestelsel

SAMENLEVING EN WETENSCHAP SAMEN VAN BELANG

De Nederlandse overheid en samenleving zijn zich terdege bewust van de relevantie en urgentie van de uitdagingen en vraagstukken op de genoemde thema's. Niet voor niets zien we deze thema's de laatste jaren op vele plekken in het overheidsbeleid terugkomen (zie de Box 'Waarom?' voor enkele voorbeelden van zulke nationale beleidskaders). De vier voorliggende Sectorbeelden maken duidelijk op welke manier de sectoren een bijdrage kunnen leveren aan een doorwrochte uitvoering van het nationale overheidsbeleid. Naast de nationale is de internationale context voor de maatschappelijke en wetenschappelijke vraagstukken natuurlijk niet weg te denken. Wetenschappelijk onderzoek van de vier sectoren wordt voor een belangrijk deel binnen internationale samenwerkingsverbanden uitgevoerd en de Nederlandse sectoren nemen daarbij sterke posities in. Veel van de genoemde maatschappelijke en wetenschappelijke vraagstukken sluiten tevens aan bij Europese en internationale beleidskaders, zoals de EU *Green Deal*, de EU Horizon R&D programma's, specifieke programma's van de Europese Commissie op het gebied van gezondheid, veiligheid, technologie (bijvoorbeeld *Artificial Intelligence*, *Quantum Technology*), klimaat en milieu, en niet te vergeten de Duurzame Ontwikkelingsdoelen (*Sustainable Development Goals*, *SDG's*), waaraan Nederland zich, samen met een groot deel van de internationale gemeenschap, gecommitteerd heeft. Met het samenbrengen van hoogwaardig academisch onderwijs en onderzoek dragen de vier sectoren bij aan bovenstaande nationale en internationale agenda's. Fundamentele kennis, kunde, modellen, methodieken en technologieën worden ontwikkeld, ingezet in onderzoek en meegegeven aan jonge, goed getrainde en getalenteerde afgestudeerden aan wie de arbeidsmarkt en de samenleving behoefte hebben bij het oplossen van de vraagstukken.

ONZE VIER SECTOREN ZIJN NODIG

De vier sectoren, waarvan de Sectorbeelden hier voorliggen, kunnen natuurlijk van elkaar onderscheiden worden ten aanzien van specifieke onderwerpen, ontwikkelingen en onderzoeksmethodieken, maar bestaan in belangrijke mate in gezamenlijkheid, met verschillende accenten, binnen het spectrum van de genoemde maatschappelijke en wetenschappelijke thema's. Ietwat versimpeld kunnen we stellen dat de Astronomie materie en leven in het universum bestudeert en de plek van onze aarde daarin, dat Aard- en Milieuwetenschappen de niet-levende natuur van die aarde bestudeert, dat de Biologie het leven en de evolutie daarvan in kaart brengt en analyseert, en dat Farmaceutische Wetenschappen bestudeert hoe we defecten/ziektes in dat leven kunnen voorkomen, behandelen en genezen. Op diverse vraagstukken vullen één of meer van de vier sectoren elkaar aan, liggen ze in elkaars verlengde of overlappen ze met elkaar, vanuit ieders eigen perspectief en

WAT?

'onze leef-werelden'

Thema's onderzoek en onderwijs:
oorsprong, samenstelling, aanpassing en evolutie van leven, universum, planeten, klimaat, veiligheid, exo-planeten (atmosferen, leven), buitenaards leven, zwarte gaten, supernova's, aard van (donkere) materie, (duurzame) energie, rampen en bedreigingen, emergente eigenschappen, biodiversiteit, gezondheid, water, voedselvoorziening, ecosystemen, leefomgeving, geneesmiddelen, ruimtelijke vraagstukken

met eigen sterktes. Voorbeelden van zulke vraagstukken staan in de Box 'Wat?'. Het is evident dat de vier sectoren daarbij intensief samenwerken met aanpalende bètasectoren als de Natuurkunde, Scheikunde, Wiskunde, Informatica en Techniek, maar zeker ook met de gamma- en communicatiewetenschappen en met de geneeskunde. De voorliggende Sectorbeelden zullen de invulling en het belang van deze samenwerking, die bovendien bijdraagt aan een effectievere organisatie en profilering van het Nederlandse academische landschap, verder aangeven.

WAT GAAN WE DOEN

Om de hierboven geschetste uitdagingen op te pakken kunnen de vier sectoren echter niet op dezelfde voet verder gaan. Zoals al eerder gezegd: de aard en urgentie van de maatschappelijke en wetenschappelijke uitdagingen noodzaakt stabiliteit en versterking van het fundament van de sectoren. Hierdoor kunnen innovaties in en vanuit het academische onderzoek sneller tot stand komen en wordt voorzien in de groeiende behoefte aan hoogwaardige systeemdenkers. De maatschappelijke en wetenschappelijke uitdagingen van onze tijd kenmerken zich specifiek door een hoge mate van complexiteit en een grote behoefte aan integraal, multi-,

inter- en transdisciplinair onderzoek en onderwijs. In alle vier de sectoren staat een geïntegreerde systeem-aanpak centraal, waarbij belangrijke actuele vragen zich afspelen aan de randen van de onderzoekdisciplines. Synergie en samenwerking tussen (sub-)disciplines worden dan ook steeds belangrijker. De sectoren moeten daarbij gebruik kunnen blijven maken van de meest geavanceerde onderzoeksfaciliteiten, -instrumentatie en -infrastructuur, van alle *state-of-the-art* technologieën, waaronder de digitale op het gebied van *Artificial Intelligence*, *Big Data*, *Data science*, *Imaging* en *supercomputing*. De noodzaak tot versterking langs alle bovenstaande lijnen (zie ook de Box 'Hoe?') geldt voor zowel het onderzoek als het academische onderwijs. Een dergelijke versterking bevordert bovendien het creëren van een evenwichtige academische omgeving wat betreft studenten- en stafaantallen, diversiteit en inclusiviteit en het aantrekken van meer (top-)talent. Dit komt niet alleen ten goede aan de academische sectoren zelf maar ook aan de arbeidsmarkt en samenleving. Wat dat laatste betreft geven stakeholders duidelijk aan behoefte te hebben aan afgestudeerden en gepromoveerden die multidisciplinair in teams kunnen samenwerken, beschikken over fundamentele domeinkennis, vaardig zijn in het omgaan met de *state-of-the-art* IT-technologieën én kennis hebben van maatschappelijke en bestuurs- of bedrijfskundige processen. Versterking van het fundament van de sectoren bevordert ook de profilering en zichtbaarheid in de samenleving; denk aan de inspiratie en fascinatie die het grote publiek heeft bij veel van de genoemde vraagstukken.

HOE?

Focus op:

Systeem-aanpak / integratie

Multi-, inter- en transdisciplinariteit

Data science / AI / *Big Data*

Inspiratie / Fascinatie / Outreach

Diversiteit / Inclusiviteit

Stakeholders / Arbeidsmarkt /
Samenleving

Onderzoeksfaciliteiten /
-instrumentatie / -infrastructuur

Student/staf-ratio

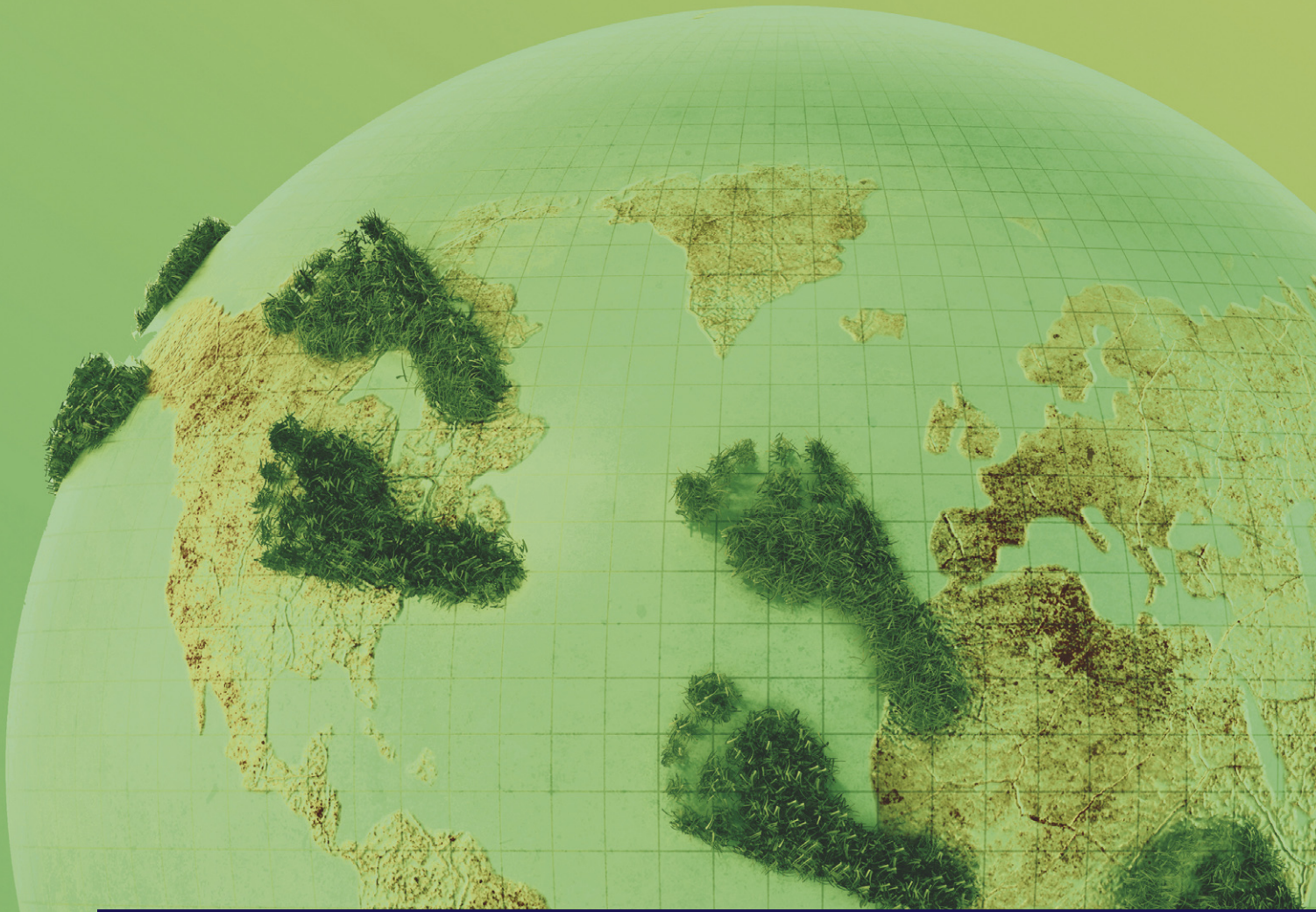
EN NU VERDER...

De Sectorbeelden van de sectoren Aard- en Milieuwetenschappen, Astronomie, Biologie en Farmaceutische Wetenschappen, worden u hier gezamenlijk aangeboden. Het belang van het versterken van het fundament van de vier sectoren samen is hierboven in algemene termen aangegeven. In de afzonderlijke Sectorbeelden wordt er concreter op dat belang ingegaan vanuit de specifieke, sector-eigen problematiek: wat zijn de meest relevante wetenschappelijke en maatschappelijke vraagstukken, welke concrete onderzoeksthema's spelen er, en wat zijn de kenmerken van het profiel van elke sector. Wij pleiten voor het continueren van de succesvolle Sectorplan-aanpak en willen Sectorplannen voor onze sectoren ontwikkelen. Voor nu wordt de lezer uitgenodigd naar de sectorvertegenwoordigers te reflecteren op de onderhavige Sectorbeelden teneinde de Sectorplannen dichterbij te brengen en daarmee bij te dragen aan de **duurzame zorg voor onze leef-werelden**.

Namens de vier sectoren,
Prof. Appy Sluijs, Aard- en Milieuwetenschappen
Prof. Amina Helmi, Astronomie
Prof. Rens Voeselek, Biologie
Prof. Roos Masereeuw, Farmaceutische Wetenschappen

Oktober 2020

SECTORBEELD 2020



RICHTING EEN DUURZAME EN VEILIGE SAMENLEVING

BEELD VAN
DE NEDERLANDSE
AARD- EN MILIEU-
WETENSCHAPPEN



KLIMAAT

Het klimaatvraagstuk is een van de belangrijkste opgaves waar Nederland en de hele wereld momenteel voor staan. Hoeveel ijs gaat er smelten en hoe snel gaat de stijging van de zeespiegel? Hoe gaan we om met de gevolgen, voor de aarde en de mensheid, en welke maatregelen kunnen we nemen om een duurzame toekomst te waarborgen? De AMW-sector levert belangrijke bijdragen aan het oplossen van essentiële vraagstukken op dit gebied.

INHOUD

TEN GELEIDE	14
DIT AMW SECTORBEELD ... IN VOGELVLUCHT	17
WAAR NEDERLAND VOOR STAAT: THEMA'S EN MAATSCHAPPELIJKE MISSIES	19
BELEIDSTHEMA'S	19
CONCRETE MISSIES	23
WAT DE AMW-SECTOR KAN DOEN: SAMEN OP MISSIE	27
DE GROTE AMW-ONDERZOEKSVRAAGSTUKKEN	27
FOCUS: MULTIDISCIPLINAIR, INTEGRAAL, NIEUWE TECHNOLOGIEËN	32
DE AMW-SECTOR: EEN STERK(ER) PROFIEL	35
HET PROFIEL VAN DE NEDERLANDSE AMW-SECTOR	35
AMW STAKEHOLDERS	39
VERSTERKING VAN HET FUNDAMENT NODIG	41
CONCLUSIE: WE ZIJN ER NOG NIET	43
BIJLAGEN	45

TEN GELEIDE

In dit beeld van de Nederlandse sector Aard- en Milieuwetenschappen (AMW) laten we zien hoe deze prachtige en waardevolle vakgebieden, de aardwetenschappen en milieuwetenschappen, de krachten bundelen. Dit biedt enorme kansen voor de organisatie van het veld en voor het versterken van het fundament van de AMW op universiteiten. Een fundament dat onmisbaar is om overheid én samenleving een helpende hand te blijven bieden bij het aanpakken van de grote maatschappelijke vraagstukken van vandaag en die van morgen.

De aardwetenschappen en milieuwetenschappen, hoewel soms verschillend in thematiek en cultuur, liggen in elkaars verlengde en zijn in belangrijke mate complementair. Het verbindende thema is de werking van onze aarde en de interacties met de mens. Deze nieuwe samenwerking is een mooi voorbeeld van hoe het nationale wetenschappelijke veld zich kan (en moet) organiseren. De synergie biedt namelijk nieuwe kansen en mogelijkheden voor vernieuwend, baanbrekend en multidisciplinair onderzoek. Daarbij aansluitend maakt het een versterking van het academische onderwijs mogelijk, mede gericht op de grote maatschappelijke uitdagingen.

De behoefte aan een sterk fundament van de AMW-sector wordt duidelijk als we kijken naar de belangrijkste maatschappelijke vraagstukken op gebieden als klimaat, milieu, water, energie, grondstoffen, voedsel, rampen en duurzaamheid. Deze uitdagingen vereisen een integrale benadering van mens, natuur en leefomgeving: een sterkte van de AMW-sector. Juist de combinatie van aard- en milieuwetenschappen is essentieel om de noodzakelijke kennis en kunde bij te dragen. In de vorm van onderzoek, maar ook door het afleveren van uitstekend opgeleid *human capital*, intrinsiek gemotiveerd om AMW-uitdagingen aan te gaan in de wetenschap en elders op de arbeidsmarkt.

De Nederlandse AMW-sector heeft een uitstekende wetenschappelijke positie opgebouwd op basis waarvan de noodzakelijke bijdragen aan de genoemde maatschappelijke uitdagingen kunnen worden geleverd. Uitdagingen uit de nationale beleidsagenda's, maar zeker ook die van internationale agenda's als de EU *Green Deal* en de VN *Sustainable Development Goals* (SDG's). Toch zal de sector, om die positie te kunnen behouden en te versterken, om die essentiële bijdrage aan het oplossen van de maatschappelijke vraagstukken te kunnen blijven leveren, niet simpelweg op dezelfde voet door kunnen gaan. De urgentie van enkele maatschappelijke uitdagingen (klimaat, energie, voedsel, veiligheid, gezondheid) noopt tot versnelling en intensivering van kennisontwikkeling en opleiding van kenniswerkers voor de arbeidsmarkt.

In de nieuwe organisatie van het veld willen we speciale aandacht besteden aan drie punten. We moeten multi-, inter- en transdisciplinariteit beter bewerkstelligen. We moeten beter gebruik maken van de nieuwste IT-technieken, zoals kunstmatige intelligentie (AI), *big data*

Het is hard nodig het fundament van de Aard- en Milieuwetenschappen te versterken om een duurzame, welvarende en veilige toekomst mogelijk te maken

en *data science*, en daarvoor de beschikking hebben over *state-of-the-art* infrastructuur en (observatie-)voorzieningen. En we moeten werken aan een nog gezondere academische omgeving wat betreft aantallen studenten en staf, diversiteit en stakeholder-betrokkenheid. Daarbij speelt dat de problematiek van nu en de komende tijd zich kenmerkt door een hoge mate van complexiteit en van een hoge mate van geïntegreerd onderzoek en 'systeemdenken', nu al een specifiek sterk punt van de sector, maar nog veel harder nodig voor de nabije toekomst. De AMW-sector wil zich, sterker georganiseerd, hierop gaan richten, in nauwe samenwerking en afstemming met andere bèta- en gamma sectoren en met een breed scala aan maatschappelijke partners.

Dit Sectorbeeld wil de lezer meenemen in de manier waarop de AMW-sector de Nederlandse overheid en samenleving kan helpen bij het zorgdragen voor een duurzame, gezonde en veilige samenleving, door het leveren van bijdragen aan belangrijke maatschappelijke missies, die liggen op het domein van aarde en milieu. Ons welzijn en onze welvaart zijn hiervan afhankelijk, want aarde en milieu doorsnijden zowat alle menselijke en maatschappelijke situaties en ervaringen.



Namens het Platform Aard- en Milieuwetenschappen,
Appy Sluijs

CIRCULARITEIT EN GRONDSTOFFEFFICIËNTIE

Strategieën worden ontwikkeld om de druk op milieu, klimaat en het natuurlijke systeem door productie en consumptie van grondstoffen en energie, te verminderen. De energietransitie, bijvoorbeeld meer windenergie, is een voorbeeld. Maar ook door materialen en producten langer in kringlopen te houden kunnen koolstofemissies en vervuiling worden verminderd. Ook kan het watergebruik worden beperkt en de voorzieningszekerheid worden verhoogd. Ook op het gebied van onderzoek naar circulariteit is Nederland wereldwijd een koploper.



DIT AMW SECTORBEELD ... IN VOGELVLUCHT

HOOFDSTUK: BELEIDSTHEMA'S EN MAATSCHAPPELIJKE MISSIES

Dit hoofdstuk laat zien hoe de AMW-sector is ingebed in de samenleving en het overheidsbeleid. Benoemd worden de grote, actuele **thema's van het overheidsbeleid** waar de AMW-sector aan bijdraagt. Concrete uitdagingen, in de vorm van **maatschappelijke missies**, worden geformuleerd. Deze geven richting aan de onderzoekagenda en het toekomstige profiel van de AMW-sector.



WAT?

HOOFDSTUK: WAT KAN AMW DOEN?

Dit hoofdstuk presenteert de inhoudelijke onderwerpen waarop de AMW-sector de samenleving bij het realiseren van de missies gaat helpen. Een overzicht wordt gegeven van de onderwerpen van de grote **onderzoeksvraagstukken** die de AMW-sector gezamenlijk gaat aanpakken. Gemotiveerd wordt het belang van een **versterkte focus** op multidisciplinariteit, integraal onderzoek en nieuwe technologieën in onderzoek en daarmee ook onderwijs.



HOE?

HOOFDSTUK: EEN STERKER AMW PROFIEL

Dit hoofdstuk schetst het profiel van de AMW-sector en verbindt dat aan de maatschappelijke missies. De belangrijkste aspecten van **onderwijs**, **onderzoek**, en **infrastructuur** van de AMW-sector worden aangegeven. Ook de AMW-**stakeholders** komen aan het woord. Benoemd worden de belangrijkste punten waarop het **fundament** van de AMW-sector **versterkt** moet worden.



WAAROM?



LEEFOMGEVING

De leefomgeving van de mens omvat een belangrijk deel van aarde en milieu. De kwaliteit van de stedelijke, landelijke en mariene leefomgeving is van groot belang voor welzijn en welvaart. Belangrijke vraagstukken die hier spelen zijn bijvoorbeeld verlies van biodiversiteit, gezonde steden, vervuiling of circulaire economie. De ruimtelijke inrichting van Nederland en het ruimtegebruik van zee, land en ondergrond zijn daarbij essentieel. Denk aan zaken als zeespiegelstijging, weersextremen, energietransitie, landbouwtransitie en verstedelijking.

WAAR NEDERLAND VOOR STAAT: THEMA'S EN MAATSCHAPPELIJKE MISSIES

Dit Sectorbeeld Aard- en Milieuwetenschappen (AMW) gaat over Nederland en over de Nederlandse samenleving. En, onlosmakelijk daaraan verbonden, gaat het over de zichtbaarheid, positie en rol van Nederland in de internationale gemeenschap, met name op het AMW-gebied. Het laat zien hoe de brede wetenschappelijke AMW-sector bij gaat dragen aan de oplossing van vraagstukken op thema's die ons allemaal raken. Daarom beginnen we hier eerst met het benoemen van voor Nederland belangrijke maatschappelijke uitdagingen, waaraan de AMW-sector essentiële bijdragen kan leveren met excellent onderzoek en onderwijs.

BELEIDSTHEMA'S

Nederland staat voor een aantal grote uitdagingen. Uitdagingen rond de waarborging van de veiligheid en de welvaart van ons land en onze bevolking. Dat waarborgen willen we op een duurzame manier doen, zodat ons land ook voor toekomstige generaties veilig en welvarend zal blijven en elders geen schade veroorzaakt.

De **maatschappelijke uitdagingen** waar we met z'n allen voor staan liggen op vele gebieden. Ze hebben bijvoorbeeld te maken met de veiligheid van onze dichtbevolkte en intensief gebruikte 'Delta aan de Noordzee'. Maar ze liggen ook op het gebied van landbouw, water en voedsel, en op het gebied van gezondheid. Grote uitdagingen zijn er ook op de gebieden duurzaamheid, circulariteit en energievoorziening, in het bijzonder de energietransitie, en de circulaire economie. Grote onderwerpen als klimaatverandering, milieu, water, energie, grondstoffen, ramppreventie en duurzaamheid doorsnijden deze grote maatschappelijke uitdagingen.

Nederland staat ook voor aanpakken, handelen en de schouders eronder. En dat doen we bij voorkeur samen, in synergie, ieder vanuit de eigen kennis en kunde. De opgaves waar we voor staan, de uitdagingen op de hierboven genoemde thema's, kenmerken zich bij uitstek als **integrale vraagstukken**, opgaves waaraan door mensen uit meerdere disciplines en met verschillende achtergronden samengewerkt moet worden. Dat samenwerken geldt in ieder geval voor mensen en organisaties uit de wetenschap, het bedrijfsleven, de overheid en andere maatschappelijke sectoren. Maar ook, zoals in dit plan, voor de vele wetenschappers onderling, met hun diverse achtergronden en disciplines uit en rondom de AMW-sector.

Nederland staat ook voor **internationale samenwerking**. Nederland wil zichtbaar zijn en een rol van betekenis blijven spelen in de wereld. Door samenwerking leert Nederland van de wereld, en de wereld van Nederland. Dat is mede relevant voor de genoemde problematiek die naast een nationale ook een sterke mondiale dimensie heeft. Het aanpakken van deze opgaves gebeurt dan ook veelal in internationaal kader. Voorbeelden in Europa zijn de recent gepresenteerde *Green Deal* en andere beleids- en R&D-programma's. Wereldwijd gaat het

bijvoorbeeld om de *Sustainable Development Goals* (SDG's), waar ook Nederland zich, samen met een belangrijk deel van de internationale gemeenschap, aan gecommitteerd heeft. De 17 SDG's omvatten vele onderwerpen die raken aan de thema's in dit Sectorbeeld. Voor het realiseren van de SDG's, zowel in Nederland als wereldwijd, is samenwerking tussen nationaal en internationaal onderzoek van belang.

Het Nederlandse **overheidsbeleid** houdt hier nadrukkelijk rekening mee, zoals te zien is aan bijvoorbeeld de brede departementale beleidsagenda's, de Kennis- en Innovatieagenda's (KIA's), het Missie-gedreven Topsectoren- en Innovatiebeleid, en de Nationale Wetenschapsagenda (NWA). In dit soort agenda's worden de relevante en urgente maatschappelijke vraagstukken gearticuleerd, waarmee de overheid aan de samenleving duidelijk maakt dat er een verantwoordelijkheid op ons allen rust om deze opgaves, ieder vanuit een eigen rol, aan te pakken. Als onderdeel van de samenleving voelt ook de AMW-sector zich medeverantwoordelijk in dit proces, specifiek op de onderwerpen waar deze sector sterk in is.

Dit Sectorbeeld gaat over vraagstukken op alle hier genoemde **beleidsthema's**:

1. Veiligheid leefomgeving
2. Landbouw, water en voedsel
3. Energie(transitie), circulariteit en duurzaamheid
4. Gezondheid

Deze vier thema's, hoewel apart benoemd, vertonen veel onderlinge samenhang en overlap. Ze hebben tenslotte betrekking op één samenleving, die eveneens gekenmerkt wordt door een complexe samenhang en structuur, waarbij niets of niemand los staat van het andere, van nationale tot mondiale schaal. Om in AMW-termen te blijven: het gaat over één aarde, bestaande uit een natuurlijk systeem en een fysiek productie-consumptiesysteem, waar we met z'n allen op een verantwoorde manier mee om moeten gaan om ook op lange termijn een duurzaam, welvarend en veilig Nederland te garanderen.

WATER

Water is een onderwerp dat voor de hele wereld, en Nederland in het bijzonder, essentieel is. Nederland is, net als bij het onderwerp landbouw, wereldwijd koploper op het gebied van watervraagstukken en watechnologie. De diverse watervraagstukken, gerelateerd aan de kwaliteit en hoeveelheid zoetwater (bijvoorbeeld droogte, overstromingen, watergebruik) maar ook zeeën, oceanen (bijvoorbeeld zeespiegelstijging, kustvering) en ijs (bijvoorbeeld ijsafsmelt), zien we in nagenoeg alle maatschappelijke thema's terugkomen.





CONCRETE MISSIES

Op het gebied van elk van de genoemde vier, nogal breed benoemde, thema's liggen diverse concrete opgaves en uitdagingen ('missies') die de komende periode opgepakt moeten worden. Daarom formuleren we hier de meest belangrijke concrete **AMW-missies** binnen deze vier thema's, die voor de komende jaren richting kunnen geven aan de AMW-onderzoeksagenda. Opgemerkt zij dat sommige onderwerpen, zoals klimaat of water, in meerdere of zelfs alle vier de beleidsthema's terugkomen en dus doorsnijdend van aard zijn. Eerst zullen deze **doorsnijdende onderwerpen** hier kort worden geschetst. Daarna bespreken we een aantal concrete maatschappelijke missies.

DOORSNIJDENDE ONDERWERPEN

Klimaat. Het klimaatvraagstuk is een van de belangrijkste opgaves waar Nederland en de hele wereld momenteel voor staat. Hoeveel gaat het opwarmen? Wat zijn de gevolgen voor de aarde en de mensheid en hoe gaan we daarmee om? En welke maatregelen kunnen we nemen om een duurzame toekomst te waarborgen? Concrete AMW-missies rondom deze klimaatvraagstukken komen terug in alle vier de beleidsthema's.

Veiligheid. Veiligheid is een onderwerp met vele dimensies, zoals de politiek-strategische en militaire dimensies en *cybersecurity*. Een andere dimensie is het waarborgen van het welzijn en de welvaart van mensen en ecosystemen. Binnen de AMW richt het thema 'civiele veiligheid' zich specifiek op die laatste dimensie, en die heeft ook betrekking op onderwerpen als voedselveiligheid, energie, zeespiegelstijging, rampen, extreem weer, vervuiling, en gezondheid.

Water. Water is een onderwerp dat voor de hele wereld en Nederland in het bijzonder essentieel is. Nederland is, net als bij het onderwerp landbouw, wereldwijd ook koploper op het gebied van watervraagstukken en watertechnologie. De diverse watervraagstukken, gerelateerd aan de kwaliteit en hoeveelheid zoetwater (bijvoorbeeld droogte, overstromingen, watergebruik en -vervuiling) maar ook zeeën, oceanen (bijvoorbeeld zeespiegelverandering, overstromingen) en ijs (bijvoorbeeld ijsafsmelt), zien we dan ook in alle vier de beleidsthema's terugkomen.

Leefomgeving. De leefomgeving van de mens omvat een belangrijk deel van aarde en milieu. De kwaliteit van de stedelijke, landelijke en mariene leefomgeving is van groot belang voor welzijn en welvaart. Belangrijke vraagstukken die hier spelen zijn bijvoorbeeld verlies van biodiversiteit (de basis van veel diensten die essentieel zijn, ook voor mensen), gezonde steden, vervuiling of circulaire economie. De ruimtelijke inrichting van Nederland over 100 jaar, alsmede zo optimaal mogelijk ruimtegebruik van zee, land en ondergrond, is een belangrijk vraagstuk, met het oog op zeespiegelstijging, weersextremen, energietransitie, landbouwtransitie en verstedelijking.

Circulariteit en grondstoffefficiëntie. Grondstoffefficiëntie en circulariteit vormt een van de meest veelbelovende strategieën om de milieudruk van productie en consumptie op het natuurlijke systeem te verminderen. Door materialen en producten langer in kringlopen te houden wordt de uitstoot van koolstofemissies verminderd, watergebruik beperkt en voorzieningszekerheid verhoogd. Nederland is wereldwijd een koploper op het gebied van onderzoek naar circulariteit.

MAATSCHAPPELIJKE MISSIES

Zoals gezegd omvatten de vier beleidsthema's vele specifieke onderwerpen. Veel van die concrete onderwerpen zijn actueel en/of urgent, en sommige vinden we daarom al terug in de vorm van vastgelegde missies of opgaves in uitgewerkte nationale of internationale beleidsprogramma's, zoals de Nationale Wetenschapsagenda, het Missiegedreven Topsectoren- en Innovatiebeleid, de Europese *Green Deal* of de *SDG's*.

De AMW-sector onderkent dat zij aan veel van die reeds bestaande, maar ook aan de nog niet vastgelegde missies kan bijdragen. Die bijdrage bestaat onder meer uit het verder versterken van het aan deze thema's gerelateerde brede kennisfundament (computermodellen, inzichten, concepten, verklaringen) dat ter beschikking staat aan wetenschap en samenleving. Maar denk ook aan het ontwikkelen en aanleveren van specifieke kennis en kunde voor de oplossing van concrete vraagstukken die op de missies betrekking hebben en aan kennisoverdracht naar en kennisuitwisseling met de maatschappelijke partners. In het bijzonder gaat het ook over de opleiding van de volgende generatie experts die op de arbeidsmarkt en in de samenleving aan de oplossing van deze vraagstukken gaan meewerken, en over doorgaande interactie met stakeholders, overheid en samenleving om de onderzoeksagenda in de juiste richting te blijven bijsturen.

Om in het vervolg de onderzoekagenda van de AMW-sector goed aan te kunnen sluiten bij de genoemde beleidsagenda's, heeft de AMW-sector, speciaal voor dit Sectorbeeld en op basis van eigen expertise en inzichten, alvast een beperkt aantal **voorbeelden van concrete maatschappelijke missies** gedefinieerd en geformuleerd in de vorm van onderstaande *missie-statements*.

Die *missie-statements* bestrijken weliswaar de volle breedte van de vier beleidsthema's, maar dekken onvermijdelijk niet alle onderwerpen in detail af. Daarvoor zijn ze ook niet bedoeld. Het is geen compleet en alomvattend pakket aan resultaatverplichtingen, noch voor de AMW-sector, noch voor Nederland. Ook hebben deze missies naast een nationale ook een internationale dimensie. En het realiseren van zulke missies is in belangrijke mate ook een zaak van politiek en beleid.

Maar deze voorbeelden van *missie-statements* laten wel zien dat de AMW-sector begrijpt waar de behoeftes vanuit de overheid en de samenleving liggen en hoe dringend die zijn. Niet voor niets klinken de missies dus zeer ambitieus. Het zijn onderwerpen waar de AMW-sector met onderzoek en onderwijs aan kan en wil bijdragen. Die AMW-bijdrage is zelfs onmisbaar, hoewel er natuurlijk meer dan alleen de AMW-sector nodig is om alle missies te realiseren. Maar deze *missie-statements* geven overduidelijk richting aan de verdere invulling en concretisering van de AMW-onderzoekagenda (zie Hoofdstuk 'Wat de AMW-sector kan doen: samen op missie').

De *missie-statements* zijn:

- In 2030 is, door betere voorspelling, vroegtijdige waarschuwingen, interventie en adaptatie, de fysieke en socio-economische schade veroorzaakt door natuurlijke en door de mens geïnduceerde rampen en extreme gebeurtenissen substantieel afgenomen.
- In 2030 zijn er duurzame (ecologische) scenario's en trajecten ontwikkeld voor een adaptieve en effectieve ruimtelijke inrichting van Nederland in een veranderende wereld.
- In 2040 is de negatieve invloed van de Nederlandse economie op ecosystemendiensten geminimaliseerd.

- In 2050 is een oplossing voor de problemen van chemische en andere milieuvervuilende stoffen in de wereld in zicht en wordt onze leefomgeving gifvrij.
- In 2040 is de voedselketen veilig, duurzaam en bestendig tegen bedreigingen van buitenaf (mens en natuur), en worden bodem, water, grondstoffen en lucht duurzaam gebruikt.
- In 2050 zijn de samenleving en ecosystemen grotendeels weerbaar tegen de directe en indirecte gevolgen van klimaatverandering.
- In 2050 zijn de koolstof-, water- en nutriëntenketens op relevante schalen gesloten, zijn negatieve broeikasgasemissies bereikt, en is in productie, opslag, transport en verbruik van energie in passende mate voorzien.
- In 2030 is de Nederlandse economie voor 50% en in 2050 voor 100% circulair.
- In 2040 is de voorzieningszekerheid ten aanzien van nu nog kritische materialen/grondstoffen voor de Nederlandse en Europese economie gegarandeerd.
- In 2050 is de stedelijke en landelijke leefomgeving duurzaam, bestendig tegen klimaatverandering, en optimaal om de gezondheid te waarborgen.
- In 2030 is de wereldbevolking voorzien van voldoende en veilig drinkwater.

Net zoals de vier beleidsthema's kunnen de concrete maatschappelijke missies niet los van elkaar gezien worden; de beleidsthema's, en dus ook de missies, belichamen integrale AMW-vraagstukken en geven de noodzaak tot verdere samenwerking aan. Om bij te dragen aan het succesvol aanpakken en oplossen van deze integrale vraagstukken is het dan ook belangrijk dat de AMW-sector goed georganiseerd en internationaal toonaangevend is. In de volgende hoofdstukken zal duidelijk worden dat het fundament en organisatie van de sector daarvoor versterkt moet worden en dat daar een intensivering van de overheidsondersteuning voor nodig is.

A photograph showing a sandy dune on the left side of the frame, with waves crashing against its base on the right. The dune is composed of light-colored sand and has some sparse vegetation at the top. The waves are white and foamy, creating a stark contrast with the blue-grey water. The sky is overcast and grey.

VEILIGHEID

Veiligheid is een onderwerp met vele dimensies. Eén daarvan is de politiek-strategische en militaire dimensie. Een andere dimensie is het waarborgen van het welzijn en de welvaart van mensen en ecosystemen. Binnen de AMW richt het thema 'civiele veiligheid' zich specifiek op die laatste dimensie, en die heeft ook betrekking op onderwerpen als voedselveiligheid, energie, zeespiegelstijging en stormen (met bijvoorbeeld kusterosie als gevolg), rampen (bijvoorbeeld aardbevingen), extreem weer, vervuiling en gezondheid.

Foto: Daphne van der Wal

WAT DE AMW-SECTOR KAN DOEN: SAMEN OP MISSIE

Voor het aanpakken van de concrete maatschappelijke missies is fundamentele kennis van en inzicht in AMW-systemen cruciaal. Je vindt nauwelijks een voorpagina of actualiteiten homepage waarin geen AMW-onderwerp genoemd is. Het AMW-onderzoek richt zich, ook nu al, op tijdige probleemoplossingen voor deze onderwerpen en vormt tevens de basis voor het identificeren van de uitdagingen van de toekomst. Wat betreft het academische onderwijs in de AMW-sector zien we dat opleidingen op AMW-gebied momenteel veel gevraagd zijn bij studenten, en dat de arbeidsmarkt deze studenten gretig afneemt.

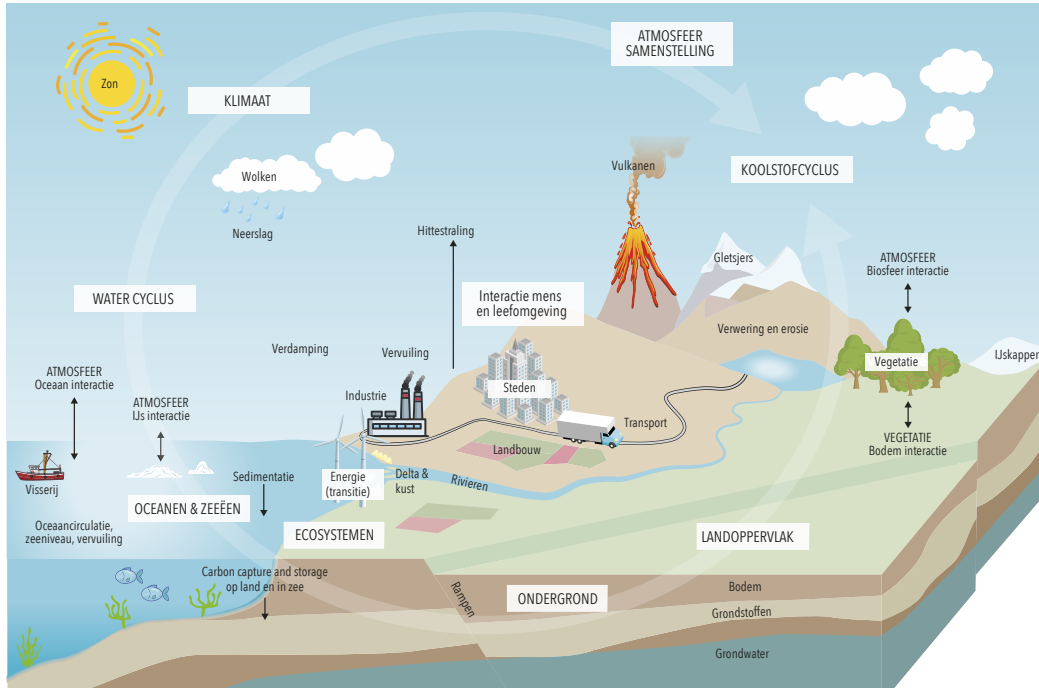
Maar de genoemde maatschappelijke missies vragen meer van het onderzoek en onderwijs van de AMW-sector dan nu al het geval is. Dat komt voor een belangrijk deel voort uit de integraliteit, actualiteit en complexiteit van de missies en de onderliggende vraagstukken. In dit hoofdstuk zullen eerst de AMW-onderzoeksvraagstukken worden genoemd die bijdragen aan het realiseren van de missies. Ook wordt aangegeven waar en hoe de AMW-sector het onderzoek moet blijven innoveren om deze bijdrage te kunnen leveren. Daarvoor is een versterking van het fundament van de sector nodig. Het AMW-onderwijs, dat sterke wortels heeft in het AMW-onderzoek, wordt gelijktijdig versterkt. AMW-onderzoek en -onderwijs zijn tenslotte beide nodig om de *work-force* op te blijven leiden met de specifieke kennis en kunde die bedrijven, instituten en de overheid in de nabije toekomst nodig hebben bij het volbrengen van de maatschappelijke missies, in Nederland en daarbuiten.

DE GROTE AMW-ONDERZOEKSVRAAGSTUKKEN

De onderwerpen die in de maatschappelijke missies naar voren komen hebben bij uitstek betrekking op onderzoeksvraagstukken die, populair gezegd, op het bordje liggen van de AMW-sector. Aan elke missie moet door meerdere AMW-disciplines op een geïntegreerde manier worden bijgedragen in onderzoek, en daaraan gekoppeld het onderwijs.

Hier zullen enkele van de meest relevante onderzoeksvraagstukken kort besproken worden. Dit overzicht kan gezien worden als de overkoepelende onderzoeksagenda van de AMW-sector ten behoeve van de maatschappelijke uitdagingen waar Nederland voor staat. Deze onderzoeksvraagstukken zien we ook in volle omvang terugkomen bij de behoeftes van de AMW-stakeholders (zie Hoofdstuk 'De AMW-sector: een sterk(er) profiel'). De indeling in aparte 'kopjes' betekent niet dat de vraagstukken op zichzelf staan. Integendeel, ze hebben allemaal betrekking op één aarde-milieu-systeem (Figuur 1). Ook raken ze aan onderwerpen als (cultuur)landschap, stedelijke gebieden en transport. Een geïntegreerde, multidisciplinaire benadering is nodig om de maatschappelijke missies te bereiken.

FIGUUR 1. HET AARDSE SYSTEEM, INCLUSIEF NATUURLIJKE EN MENSELIJKE FACTOREN



Hier zij nadrukkelijk opgemerkt dat alle hierna beschreven onderzoeksvraagstukken, veelal te maken hebbend met de impact van en op de mens en zijn leefomgeving, niet alleen gereleateerd zijn aan andere natuurwetenschappelijke sectoren, maar ook sterk aan economische, ruimtelijke, technische, sociale, juridische en ethische aspecten.



KOOLSTOF CYCLUS

Voor het terugdringen van het CO_2 en CH_4 (koolstofdioxide en methaan) gehalte in de atmosfeer is kennis van de koolstofcyclus onontbeerlijk. Deze cyclus omvat het hele Systeem Aarde: de atmosfeer, de bodem en ondergrond, oceanen, kust- en binnenwateren, de biosfeer (het leven) en ecosystemen, en de interacties tussen deze sferen. Onderwerpen op de agenda zijn onder meer: bronnen en hoeveelheden CO_2 - en CH_4 -uitstoot, gebruik van fossiele brandstoffen, verzuring van oceanen, en het verbeteren van het begrip van de werking, omvang en relevantie van álle schakels in de koolstofcyclus, met een consistente kwaliteit en vergelijkbare onzekerheidsmarges. Sinds enige tijd wordt er daarnaast ook met veel interesse gekeken naar zogenaamde negatieve emissies, vrij te vertalen als het uit de atmosfeer halen van CO_2 en in verschillende vormen opslaan in oceanen, op land en ondergronds. Er zijn ten aanzien hiervan nog vele fundamentele natuurwetenschappelijke vraagstukken. Denk bijvoorbeeld aan: is het op grote schaal CO_2 uit de atmosfeer halen een effectieve methode en is in dat geval de benodigde technologie er al, is stimuleren van natuurlijke opname effectief, op welke locaties kan/mag/moet opslag op land en in zee, wat is het effect op landgebruik of op (grond)waterniveaus, en welke lokale, regionale, nationale en mondiale gevolgen zijn er te verwachten?



KLIMAATVERANDERING

Klimaatverandering is een doorsnijdend onderwerp in alle maatschappelijke missies en het komt bij vele onderzoeksvraagstukken in de AMW-sector aan de orde. Bovenaan staat de vraag: hoe snel en sterk zal de klimaatverandering en opwarming van de atmosfeer, oceaan, kust- en binnenwateren en land zijn en zal deze geleidelijk zijn of met sprongen (*tipping*

points)? Maar net zo belangrijk: wat zal de impact zijn op de natuur en maatschappij, op ijsafsmelt en zeespiegelstijging (denk aan het verschil in invloed voor de Nederlandse kust van de afsmelt van Groenland versus Antarctica), op extreme weersverschijnselen, op de mens, ecosystemen, voedselzekerheid, grondstoffen, zout en zoet water, droogte, ruimtelijke en landschappelijke inrichting, etc. En wat zijn mogelijke oplossingen? Hoe kunnen we ons aanpassen en erger voorkomen? Wat is het potentieel van *nature-based* oplossingen? Maar ook een controversieel onderwerp als *geo-engineering* (interventies in Systeem Aarde die klimaatverandering mogelijk tegengaan) is relevant om te onderzoeken. De AMW-sector werkt in gezamenlijkheid aan beter systeembegrip en betere modellen voor het systeem in zijn geheel, want alleen dan kunnen de directe en indirecte gevolgen voldoende betrouwbaar in kaart worden gebracht en effectieve oplossingen gezocht worden.



WATERCYCLUS

De watercyclus verbindt alle onderdelen van aarde en milieu met elkaar. De intensivering van de mondiale watercyclus, als gevolg van klimaatverandering, betekent dat er meer extreme situaties op verschillende plekken in die kringloop ontstaan: overstromingen, droogtes, extreme weersverschijnselen, met mogelijke impact op bodemdaling, drinkwatervoorziening, waterkwaliteit, voedselvoorziening en veiligheid van de leefomgeving, met name in stedelijke delta's. Ook de directe impact van de mens op de watercyclus, door het bouwen van dammen en overmatig grondwater- en oppervlaktewatergebruik, is aanzienlijk, in het bijzonder tijdens perioden van waterschaarste. De fundamentele en interdisciplinaire kennis over de interacties tussen zoet- zout- en grondwater, bodem, vegetatie, oceaan, kust, atmosfeer en menselijk handelen moet hiervoor verder ontwikkeld worden, in relatie tot de vraag naar voldoende en schoon water. Belangrijke vraagstukken zijn bijvoorbeeld: hoe beïnvloedt klimaatverandering de watercyclus in de toekomst, welke veranderingen in landgebruik hebben invloed en welke ecosysteem-diensten zijn daarbij van belang, hoe monitoren we de watercyclus op de noodzakelijke ruimtelijke en temporele schalen, hoe zorgen we voor meer circulariteit en een lagere water-voetafdruk, welke nieuwe watermanagementopties bieden oplossingen, hoe houden we de toekomstige water- en bodemkwaliteit op peil?



DUURZAME ENERGIE

Essentiële ontwikkelingen in de energietransitie stoen op de AMW-sector. Belangrijke afspraken zijn en worden gemaakt op politiek en maatschappelijk niveau, en de daaruit voortvloeiende inhoudelijke vraagstukken moeten door de experts op dit gebied opgepakt worden. Daarbij kan het energievraagstuk niet los gezien worden van duurzaamheidsvraagstukken op het gebied van water, grondstoffen en voedsel. Concrete vraagstukken die hier spelen zijn bijvoorbeeld: hoe identificeren en ontwikkelen we optimale en veilige locaties voor de opwekking en exploitatie van andere vormen van energie dan van fossiele oorsprong (zon, wind, water, geothermie, biomassa), en wat is de impact van grootschalig gebruik hiervan op onze leefomgeving en ecologie?



CIRCULARITEIT EN LEVERINGSZEKERHEID VAN GRONDSTOFFEN

Hoewel velen ervan overtuigd zijn dat we toe moeten naar een volledig circulaire economie en voedselvoorziening, moeten er op dit gebied nog antwoorden gevonden worden op essentiële en fundamentele natuurwetenschappelijke vraagstukken. De AMW-sector speelt een leidende rol in vele daarvan. Belangrijk is het beter en betrouwbaarder in kaart brengen en analyseren van de natuurlijke en gebruikscycli en *supply chains* van grondstoffen en producten. Dit geldt zowel voor nieuw te winnen – ruwe – grondstoffen en kritische materialen als voor de stoffen en producten in de recycling-cyclus, en dient op zowel macro- (tot mondiale schaal) als micro- (elementair/deeltjes/synthetische chemicaliën) niveau te gebeuren. Hoe

kunnen we vervolgens productieketens sluiten op een veilige manier met waarborgen voor gezondheid van mens en ecosystemen? En hoe hangt dit samen met een verlaging van de ‘milieu-voetafdruk’ en met de vraag welke grondstoffen we beter niet meer zouden moeten willen produceren? Nederland en Europa hebben op dit moment ook grote problemen ten aanzien van zekerheid tot toegang tot grondstoffen, met name kritische materialen zoals zeldzame elementen, terwijl tegelijkertijd volgens sommige voorspellingen het gebruik van bepaalde chemische stoffen in de komende jaren juist flink zal toenemen. Naast betere informatie over de ondergrond is ook hier het circulair maken van de economie, het overbodig maken van toxische en kritische materialen in producten en het in kaart brengen en transparant maken van *supply chains* essentieel.



ECOSYSTEEM-DIENSTEN

De verandering van de – land- en watergebonden – biodiversiteit en ecosystemen waaraan de mens diensten ontleent is een belangrijke indicator voor de gezondheidstoestand van de mens en zijn leefomgeving. Vraagstukken die hier spelen zijn bijvoorbeeld: wat zijn de belangrijkste oorzaken van biodiversiteitsverlies en zijn er *tipping points*, hoe kunnen we effectief ingrijpen om dit mondiale verlies om te buigen, hoe kunnen we de ecosysteem-kwaliteit verbeteren, hoe verhouden mondiale ecosysteemveranderingen zich tot nationale en lokale, wat is de impact van menselijke activiteiten op ecosysteem-diensten, ontwikkeling van nieuwe *remote sensing* methoden voor ecosysteem-monitoring en –beheer, ontwikkelen van methoden en scenario’s voor herstel en bestendig houden van ecosysteem-diensten. Ecosysteem-diensten raken direct aan onze landbouw, veeteelt, visserij, watervoorziening, voedselproductie en toerisme, maar ook bijvoorbeeld aan veiligheid (bijvoorbeeld kustverdediging door middel van *building with nature*). Zulke ecosysteem-diensten kunnen ook actief worden ingezet ter bevordering van onze gezondheid, zoals het verminderen van hittestress in steden. Het is dan ook essentieel om de – lange termijn – relaties tussen de gezondheid van ecosystemen, de economie, klimaat, maatschappelijke ontwikkelingen, watermanagement, en de landbouw- en voedselsystemen, beter en betrouwbaarder te kunnen monitoren en modelleren.



RAMPEN EN BEDREIGINGEN

Er zijn vele soorten rampen en bedreigingen, op verschillende tijd- en ruimtelijke schalen. Voorbeelden zijn: zeespiegelstijging, aardbevingen, bodemdaling, overstromingen, droogte, hittegolven, bosbranden, vervuiling, pandemieën, stormen, vulkaanuitbarstingen, aardverschuivingen, erosie, ruimteweer, etc. Zulke gebeurtenissen kunnen een natuurlijke oorsprong hebben, maar worden vaak geïnduceerd of versterkt door menselijk handelen, zoals de aardbevingen in Groningen. Een aanzienlijk deel van deze bedreigingen hangt nauw samen met klimaatverandering, terwijl de blootstelling daaraan sterk afhankelijk is van sociaal-economische ontwikkelingen. We willen de impact op mens, leefomgeving en economie van dit soort gebeurtenissen beter kunnen voorzien en beheersen. Vraagstukken zijn bijvoorbeeld: welke aanpassingen doen we vooraf nemen om de impact van rampen te beperken, hoe brengen we meer diversiteit en redundantie aan in onze systemen om weerbaarder te zijn, wat zijn daarbij de beste scenario’s en strategieën, hoe hangen de verschillende soorten rampen en bedreigingen met elkaar samen, wat kunnen we leren uit snelle mondiale veranderingen in het (verre) verleden, hoe kunnen we de impact op de economie beter beschrijven, wat moet er nog gebeuren om betrouwbare *early warning*-systemen in te richten, en hoe kunnen we ons beter voorbereiden op een onzekere toekomst? Het modelleren en monitoren van aard- en milieusystemen en de interacties daartussen, is essentieel om zulke gebeurtenissen te kunnen begrijpen, te verklaren, op tijd te zien aankomen en ons erop voor te bereiden.



VOEDSELVOORZIENING

De voedselvoorziening in Nederland, Europa en de wereld is met elkaar verbonden. De VN *Sustainable Development Goals* streven naar een wereld waarin niemand honger lijdt, en waarin iedereen toegang heeft tot veilig, voedzaam en voldoende voedsel. Dit is een grote uitdaging, gegeven de huidige bevolkingsgroei en de verwachtingen omtrent klimaatverandering. In sub-Sahara Afrika bijvoorbeeld lijden nog steeds mensen honger, en is ondervoeding een actueel probleem. Voldoende voedsel en water zijn daarom belangrijke thema's voor de toekomst. De vraag hoe we ons voedsel duurzaam kunnen produceren is actueler dan ooit, en is van belang voor de stabiliteit in diverse wereldregio's met uitstraling daarbuiten. Dit geldt ook voor Nederland, waar we rekening moeten houden met toekomstige veranderingen in het klimaat, en toekomstige veranderingen in productie van, en vraag naar voedsel in en buiten Nederland. De afgelopen droge zomers hebben laten zien hoe kwetsbaar ook Nederland is voor dergelijke veranderingen. Belangrijke thema's voor toekomstig onderzoek zijn dan ook gerelateerd aan de vraag hoe de bevolking van Nederland, Europa en de wereld te voeden, zonder ecosystemen aan te tasten. Dit vereist een interdisciplinaire aanpak, waarin gezocht wordt naar efficiënte, duurzame oplossingen voor de toekomst, rekening houdend met lokale en internationale maatschappelijke kennis en ontwikkelingen, alsmede verwachtingen rondom klimaatverandering. Nederlands onderzoek kan hierin leidend zijn.



RUIMTELIJKE VRAAGSTUKKEN

Zeker in een land als Nederland, waar (onder)grond, zee en lucht een veelheid aan gebruik kennen hebben ontwikkelingen zoals hierboven beschreven een directe relatie met, en impact op, de ruimtelijke organisatie van het stedelijke, landelijke en mariene gebied waarin we leven, voedsel produceren en verzamelen, en recreëren. Dan gaat het over onderwerpen als: verstedelijking, landgebruik en -degradatie, kustverdediging, bodemdaling, warmteopslag in de bodem, opslag/verwerking van afval, ruimte voor rivieren, infrastructuur (bijvoorbeeld energie, mobiliteit), veiligheid, landbouw, veeteelt, visserij en voedselvoorziening, gezonde ecosystemen, etc. Voor Nederland als dichtbevolkte delta en voor vele gebieden wereldwijd, is een duurzame ruimtelijke ordening van groot belang. Essentieel daarbij is een fundamenteel begrip van de invloed van externe ontwikkelingen als klimaatverandering op de ruimtelijke ordening. Daarnaast spelen nog andere vraagstukken, bijvoorbeeld: inrichting van de (ondiepe) ondergrond, het ruimtebeslag van hernieuwbare zonne- en windenergie, wat te doen met (kern)afval, klimaatbestendige steden, inschatting en beheersing van risico's, etc. Voor zulke vraagstukken zijn ruimtelijke en temporele data en goede data analyses van groot belang, inclusief ontwikkelen en toepassen van nieuwe methoden en inwinning uit bijvoorbeeld satellieten en sensoren, observaties en combinaties van *big data*.



GEZONDHEID EN OMGEVING

In het complete aard- en milieusysteem, waar alle onderdelen interacties met elkaar hebben, is de gezondheidstoestand van alle organismen – inclusief de mens – direct afhankelijk van natuurlijke of door de mens geïnduceerde veranderingen in dat systeem. Met name in de samenhang tussen de gezondheid van mens en het aardse systeem (Figuur 1) moet beter inzicht worden verkregen. Dan gaat het ook om bijvoorbeeld het beter begrijpen, modelleren, monitoren en voorspellen van de aanwezigheid, het transport en de effecten van vervuulende en giftige stoffen (chemische, biologische, plastics) en de impact daarvan op de gezondheidstoestand van mens, dier, plant, eencellige en ecosysteem, en het voorspellen van de ruimtelijke verspreiding van ziektes. Dit is van direct belang voor de landbouw, voedselveiligheid, lucht-, water- en bodemkwaliteit en ecosysteem-diensten.

FOCUS: MULTIDISCIPLINAIR, INTEGRAAL, NIEUWE TECHNOLOGIEËN

De AMW-onderzoeksvraagstukken, die in de vorige paragraaf beschreven zijn, hebben alle een geïntegreerd en multidisciplinair karakter. Dat wil zeggen dat bij het onderzoek meerdere AMW-(sub-)disciplines samenwerken en er vergaande samenwerking is met aanpalende sectoren. Dit is ook precies wat er nodig is om bij te dragen aan de antwoorden op de maatschappelijke missies. De versterking die de AMW-sector nodig heeft is dan ook specifiek gericht op het verder **versterken en uitbreiden van de multidisciplinaire samenwerkingen**, verdere integratie van thematieken, schaalniveaus en onderzoeksmethodieken, waarbij elke onderzoeksgroep fundamentele kennis en kunde inbrengt en door middel van **gezamenlijke projecten, posities en curricula** die integrale vraagstukken op de snijvlakken gaan aanpakken. Binnen de sector leidt deze onderzoekversterking ook op een natuurlijke manier tot de gewenste versterking van de multidisciplinariteit van het academische onderwijs. Ook de AMW-stakeholders hebben hun behoefte aan deze multidisciplinariteit nadrukkelijk aangegeven (zie Hoofdstuk 'De AMW-sector: een sterk(er) profiel').

De voorgestelde, multidisciplinaire aanpak is gebaseerd op het beschouwen van **aarde en milieu als één systeem** dat bestaat uit verschillende subsystemen en de interacties daartussen, en waarbinnen een duurzame economie gerealiseerd moet worden (Figuur 1). Het op de relevante ruimtelijke en temporele schalen begrijpen en modelleren van dit systeem met zijn interacties, biedt de mogelijkheid om processen en ontwikkelingen door te rekenen ten behoeve van verder wetenschappelijk onderzoek en dienstverlening aan overheid en samenleving op het gebied van de maatschappelijke missies. Zie het als *Digital Twin Earth* modellen, waarin aard- en milieuwetenschappelijke inzichten geïntegreerd worden met kennis over economische, ecologische en sociologische systemen. En door het integreren van modellen en simulaties kunnen huidige en toekomstige ontwikkelingen gesimuleerd worden.

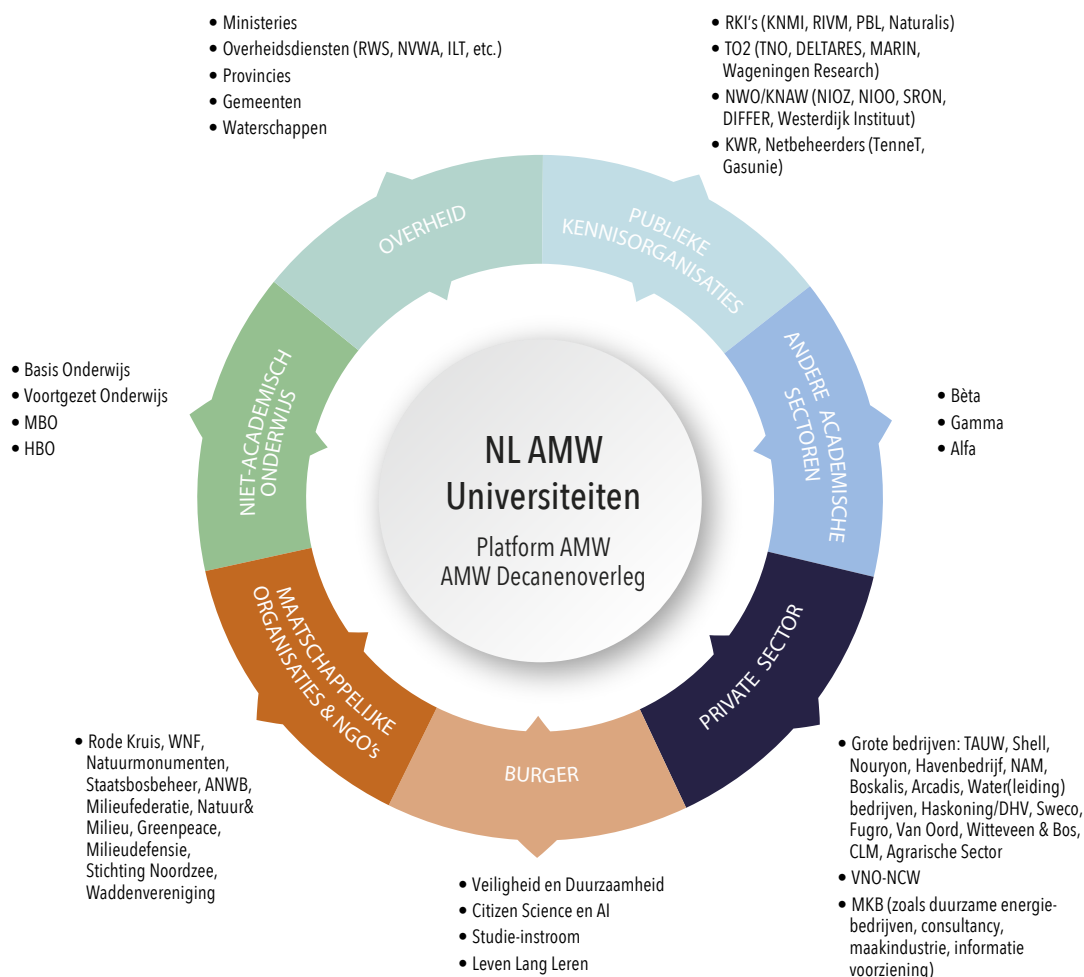
Om modellen, algoritmes en tools in de Aard- en Milieuwetenschappen te kunnen blijven ontwerpen, bouwen en gebruiken, is veel rekenkracht nodig. *State-of-the-art* IT-technologieën en -infrastructuur zijn hiervoor nodig en vragen met urgentie om verdere ontwikkeling en investeringen. Het is van het grootste belang dat deze modellen gevoed en geverifieerd kunnen worden met data en informatie van hoge kwaliteit uit diverse bronnen, van sensornetwerken in en op de grond en in de lucht en ruimte, tot *citizen science* en andere *big data* bronnen. Hiervoor is een omvangrijke, innovatieve, en gedeeltelijk nog te realiseren observatie- en monitoringinfrastructuur noodzakelijk. Ook uiterst noodzakelijk zijn verdere investeringen in de koppeling tussen de data en modelinfrastructuur, en in verdere integratie van bestaande infrastructuur op subdomeinen, zodat *Digital Twins* kunnen worden ontwikkeld. Er zijn tal van ontwikkelingen in sensoren en data-inwinning, en nieuwe kunstmatige-intelligentie-ontwikkelingen maken het mogelijk om sneller en meer te leren uit dit soort grote datasets. Vervolgens moeten de modellen kunnen draaien op grote en kleine tijd- en ruimteschalen, en moeten geavanceerde methodes voor digitalisering, modellering van meetfouten, data-assimilatie, *feedback loops*, filtering en voorspelling, en visualisatie en interpretatie ingezet worden.

In dit kader vernieuwt en versterkt de AMW-sector daarbij ook de noodzakelijke samenwerking met **andere sectoren en disciplines** die bij het betreffende onderzoek relevant zijn, zoals met de biologie, de chemie, de natuurkunde, technische wetenschappen en informatica, en gammawetenschappen als economie, ruimtelijke wetenschappen, sociologie, beleids-, bestuurs- en politieke wetenschappen en communicatiewetenschappen. Het is duidelijk dat

de grote vraagstukken op de vier beleidsthema's (zie Hoofdstuk 'Waar Nederland voor staat: thema's en maatschappelijke missies') in gezamenlijkheid met alle relevante academische sectoren en stakeholders aangepakt moeten worden (Figuur 2). Neem als voorbeeld de samenwerking van de AMW-sector met de gammawetenschappen, om vraagstukken aan te pakken zoals: hoe wordt de energietransitie geïmplementeerd en tot welke interventies leidt dat, hoe gaan we om met de uiteenlopende (en soms tegenstrijdige) belangen van diverse belanghebbenden, wat is de invloed op de mens van rampen en bedreigingen en van veranderingen in de ruimtelijke ordening en de leefomgeving, hoe reageren mensen op – voorspellingen over – klimaatverandering, hoe brengen we milieu, maatschappij en bestuur met elkaar in balans, hoe zal de maatschappij om – moeten – gaan met nieuwe technologieën, etc. Tools en methoden uit de ene sector kunnen ingezet worden in de andere en op die manier kunnen sectoren elkaar versterken.

FIGUUR 2. HET NEDERLANDSE AMW DISCIPLINE-LANDSCHAP

De universiteit is het fundament van kennis, kunde en *human capital*. Dit nationale landschap is sterk vervlochten met Europese en mondiale partners en agenda's (niet afgebeeld).





ONDERWIJS EN ONDERZOEK

Wetenschappelijke staf, promovendi en studenten doen samen onderzoek voor het genereren van kennis en academische ontwikkeling. Hier is zojuist een boorkern aan boord gekomen van het onderzoeksschip *Pelagia* tijdens de Netherlands Initiative Changing Oceans (NICO) expeditie in 2018.

Foto: Wouter Hooijmans/NIOZ

DE AMW-SECTOR: EEN STERK(ER) PROFIEL

De bijdrage van de AMW-sector aan het aanpakken van de maatschappelijke missies is, zoals we in het vorige hoofdstuk gezien hebben, omvangrijk en veelzijdig. Hier zal worden toegelicht waarom een fundamenteel sterkere AMW-sector er goed voor geëquipeerd is om deze bijdrage daadwerkelijk te leveren. Om de sterkte van het huidige en toekomstige potentieel van deze sector daarbij ten volle te benutten, zet de sector noodzakelijke vervolgstappen in onderzoek en onderwijs en versterkt de integrale en multidisciplinaire samenwerking door betere nationale organisatie en profilering. Ook is een verbetering van diversiteit binnen de academische staf nodig. Voor deze versterking van het fundament van de AMW-sector is een intensivering van de ondersteuning voor onderwijs en onderzoek vanuit de overheid noodzakelijk.

HET PROFIEL VAN DE NEDERLANDSE AMW-SECTOR

De Nederlandse AMW-sector is van internationaal topniveau (Bijlage 4). De sector kenmerkt zich door een breed maar samenhangend palet aan disciplines, subdisciplines en onderzoeksgebieden die in meer of mindere mate al met elkaar verbonden zijn in onderwijs en onderzoek. Het bestuderen en begrijpen van het natuurlijke systeem van aarde en mens behoeft evident **multidisciplinaire** kennis en kunde. Dat sluit aan bij de eerdergenoemde maatschappelijke missies (Hoofdstuk 'Waar Nederland voor staat: thema's en maatschappelijke missies') en onderzoeksvraagstukken (Hoofdstuk 'Wat de AMW-sector kan doen: samen op missie'), die zich voor een belangrijk deel afspelen op – en over – de grensvlakken van de verschillende AMW-disciplines en onderzoeksgebieden. Vanwege het grote belang van het aanpakken van de maatschappelijke missies zet de AMW-sector dus stevig in op het verder versterken van de **integratie** van onderzoek en onderwijs binnen de onderliggende disciplines.

ONDERZOEK

Mens en aarde verbinden de AMW-disciplines en onderzoeksgebieden met elkaar. De behoefte van de mens aan een veilige en duurzame samenleving doet een beroep op de aarde daaromheen als bron van hulpmiddelen. De draagkracht van de aarde is daarbij een randvoorwaarde voor menselijk handelen. Interacties tussen de mens, de fysieke structuren die door de mens zijn opgezet, zijn leefomgeving en de aarde zijn daarbij een verbindend thema. Vanuit het 'systeemdenken' kunnen we deze verbinding tussen mens-milieu-aarde zien als een **geïntegreerd systeem**, dat gekoppeld kan worden aan economische, ecologische en sociologische systemen.

Voorop staat dat we met dit natuurlijke systeem op een verantwoorde manier moeten omgaan om een veilige en duurzame samenleving te kunnen blijven garanderen. De AMW-sector draagt drie fundamentele stappen bij aan dit proces. Ten eerste brengt het de structuur, eigenschappen en ontwikkelingen van dit systeem in kaart (observeren en modelleren).

Vervolgens analyseert en verklaart de sector de werking ervan (processen, interacties). Ten slotte projecteert AMW die kennis met modelsimulaties naar toekomstige toestanden van het systeem, op basis waarvan beslissingen voor eventuele noodzakelijke interventies genomen kunnen worden om negatieve gevolgen te voorkomen en veiligheid en duurzaamheid te waarborgen. De krachtenbundeling van de milieuwetenschappen met de aardwetenschappen biedt grote kansen op dit domein en wordt dan ook gezien als een sterkte voor de Sectorplanontwikkeling.

Het versterken van de integratie betreft niet alleen de thema's en onderwerpen, maar ook de onderzoeksmethodieken en -faciliteiten: denk aan observeren, inventariseren, meten, monitoren, modelleren, analyseren, valideren, beschrijven, verklaren en voorspellen. Betere nationale organisatie en profilering is nodig om de eigen accenten en sterktes met deze methodes van de milieuwetenschappen en aardwetenschappen te complementeren. De verschillende universiteiten en maatschappelijke stakeholders, zoals kennis- en onderzoeksinstituten, versterken elkaar zo optimaal bij het aanpakken van de maatschappelijke missies, wat een voorbeeld is van wat we 'verticale integratie' zouden kunnen noemen.

AMW is onderdeel van het wetenschappelijke bèta-domein. Uit de centrale positie die 'mens en aarde' innemen in het AMW-onderzoek, en uit de beschrijving (Hoofdstuk 'Wat de AMW-sector kan doen: samen op missie') van de meest relevante onderzoeksvraagstukken, volgt dat afstemming en samenwerking met andere bètawetenschappen, zoals de biologie, de chemie, de natuurkunde, de wiskunde en informatica, en de technische wetenschappen, als vanzelfsprekend worden gezien. Omdat daarnaast bij nagenoeg alle maatschappelijke missies de interactie van het natuurlijke systeem met het menselijk handelen een essentiële rol speelt, relateert de AMW-sector ook sterk aan gammawetenschappen bijvoorbeeld de sociologie, economie, psychologie, beleids-, bestuurs-, ruimtelijke en politieke wetenschappen, en de communicatiewetenschappen.

De AMW-sector kan bogen op een *track record* van internationale allure en een toonaangevende internationale positie van wetenschappers en vakgroepen. Om de noodzakelijke AMW-vraagstukken, gericht op de maatschappelijke missies en beleidsthema's, met verve te kunnen aanpakken, is echter een betere organisatie en een sterker fundament nodig. Daarvoor is intensivering van de financiering van de sector nodig. Die versterking is in het belang van de maatschappij. Met die versterking richt de AMW-sector zich specifiek op optimale nationale organisatie, uitbreiding van de multidisciplinaire samenwerkingen, verdere integratie van thematieken, schaalniveaus en onderzoeksmethodieken, en de integratie van *state-of-the-art* IT-technologieën zoals AI.

ONDERWIJS

Het versterken van het fundament van de AMW-sector gaat net zozeer over onderwijs als over onderzoek. Academisch onderwijs is ingebed in wetenschappelijk onderzoek en vice versa. Ze kunnen niet los van elkaar bestaan. Daardoor zal de thematiek en aard van het onderwijs ook aansluiten op de nieuwe ontwikkelingen in het AMW-onderzoek en behoeftigheden van bedrijven, instituten en overheidsinstellingen. Inhoudelijke ontwikkelingen in het onderwijs zullen dus in dezelfde thematiek plaatsvinden als in het onderzoek. Dat kan, praktisch gezien, ook goed georganiseerd worden omdat alle wetenschappelijke staf dezelfde inhoudelijke expertise nodig heeft in het onderzoek en onderwijs.

Diepgaande, fundamentele kennis en kunde over aarde en milieu, zoals de AMW-sector die aanbiedt in opleidingen aan alle AMW-universiteiten (Bijlage 3), is essentieel voor het aanpakken van de maatschappelijke missies. Onze maatschappelijke stakeholders (Bijlage 2, Figuur 2) dichten dan ook grote waarde toe aan de disciplines. Vanwege de complexiteit en het integrale karakter van de maatschappelijke missies en de daaraan gerelateerde onderzoeksvraagstukken, verwacht de samenleving, naast een sterke disciplinaire basis, steeds vaker inter- en transdisciplinariteit van de academische afgestudeerden: het in staat zijn om de eigen (sub-)discipline te ‘overstijgen’ en samen met mensen uit zeer verschillende disciplines en niet-academische stakeholders problemen te overzien en op te lossen (zie ook de behoefte van de stakeholders hierna).

Het academische onderwijs in de AMW-sector zal zich daarom gaan richten op, onder meer:

- het organiseren van institutionele profilering en tegelijkertijd beter afgestemde, en meer gezamenlijke en geïntegreerde bachelor/master-opleidingen,
- het versterken van de ontwikkeling van de bijbehorende competenties op het gebied van multi-, inter- en transdisciplinariteit,
- effectieve aandacht voor de samenhang met vraagstukken en onderwerpen uit andere, aanpalende academische disciplines en sectoren,
- aandacht voor de meerwaarde van het combineren van diverse observationele/ experimentele en statistische/proces-gebaseerde onderzoeksmethodieken, zoals nieuwe mogelijkheden in *artificial intelligence* en *big data* analyse,
- voldoende en effectieve aandacht in het academische onderwijs voor de maatschappelijke en sociaal-geesteswetenschappelijke dimensies van de AMW-onderwerpen, waarbij op de fundamentele AMW-kennis, als basis van de opleidingen, wordt verder gebouwd.

Dit versterkt het academische AMW-onderwijs. Ook drukt de student-staf ratio zwaar op de kwaliteit van het onderwijs in de sector en ook hiervoor is extra investering noodzakelijk. Verder is duidelijk dat deze investeringen de kans bieden een sterke verbetering van de diversiteit binnen de academische staf in de AMW-sector te bewerkstelligen (Bijlage 5). Deze investeringen in het fundament van het AMW-onderwijs zijn hard nodig om de grote maatschappelijke onderzoeksvraagstukken, die van vandaag maar ook die van morgen, effectief het hoofd te kunnen bieden.

INFRASTRUCTUUR

Onderzoek en onderwijs in de AMW-sector maken op grote schaal gebruik van verschillende vormen van infrastructuur en faciliteiten. Het is evident dat het observeren, zowel incidenteel als continu (monitoren), van alle onderdelen van en processen in de (sub-)systemen van aarde en milieu, van cruciaal belang is. Dit gaat over alle grote AMW-onderzoeksvraagstukken van Hoofdstuk ‘Wat de AMW-sector kan doen: samen op missie’, van het in kaart brengen van materiaal-, energie-, product- en afvalstromen en klimaatverandering in de oceaan, tot het monitoren van bewegingen in de ondergrond. Daarvoor is een omvangrijke en gevarieerde **meetinfrastructuur** noodzakelijk, bestaande uit sensoren/meetinstrumenten die ingezet worden op platforms in de lucht, in de ruimte, op, onder en boven de grond, en in zoet en zeewater. De AMW-sector wil ontwikkelingen nog beter op nationaal niveau coördineren. De nieuwe uitdagingen zoals geformuleerd in de maatschappelijke missies vereisen het continu actualiseren, uitbreiden, verbeteren, integreren en verfijnen van de meetinfrastructuur. Het gaat dan ook om geautomatiseerde waarnemingen in continue tijd- en ruimteschalen. Denk bijvoorbeeld aan nieuwe sensoren met ingebouwde AI-functionaliteit. Door de grote toename in de beschikbaarheid van nieuwe dataproducten (zoals satellietdata), komt

INFRASTRUCTUUR

Onderzoek en onderwijs in de AMW-sector maken op grote schaal gebruik van verschillende vormen van infrastructuur en faciliteiten. Denk aan laboratoria, IT-infrastructuur en nationale onderzoeksfaciliteiten als schepen. Essentieel is een moderne observatie- en meetinfrastructuur, zoals sensoren/meetinstrumenten die ingezet worden op platforms in de lucht, op, onder en boven de grond, en in zoet en zee-water. En natuurlijk, zoals hier, op satellieten in de ruimte. *Satellite remote sensing* is cruciaal voor de AMW.

Foto: © Copernicus Sentinel, 2020



meer temporele en ruimtelijke informatie beschikbaar. Nederland speelt een belangrijke rol in deze ontwikkelingen, met een unieke positie in Europa (ESTEC is hier gevestigd). Ook voor onderzoek in laboratoria en werkplaatsen is *state-of-the-art* infrastructuur/faciliteiten noodzakelijk. Vanuit de AMW-stakeholders wordt aangegeven (zie hierna) dat het belangrijk is deze infrastructuur gezamenlijk op te bouwen, te beheren en te gebruiken. Investeren hierin zal Nederland een nog aantrekkelijkere partner maken in internationale kennis-consortia en zal onmisbaar blijken als voeding van het beoogde geïntegreerd systeembegrip en -modellering.

Met meet- en laboratoriumapparatuur wordt veel data ingewonnen. Maar ook zijn er veel statistische en nieuwe *big data*-bronnen voorhanden die essentieel zijn voor voornoemde monitoring. Daarnaast is er veel data die slechts moeizaam ontsloten kan worden (*tedious data*). Al deze AMW-data vormen een belangrijke pijler onder de *data driven economy*. Voor het verwerken van de enorme en groeiende hoeveelheden data is het kunnen gebruik maken van een *up-to-date* IT-infrastructuur noodzakelijk. Onderdeel van de wereldwijde digitalisering is dat er steeds meer technologieën beschikbaar komen voor geavanceerde *data science*, denk aan *artificial intelligence* en *machine learning*, *high-performance computing*, *data mining* en *big data analytics*, 3D en 4D visualisatie technieken, maar ook de ontwikkeling van *Digital Twin Earth* modellen. Dan gaat het om zowel soft- als hardware, en moderne netwerk- en communicatie-infrastructuur.

Wetenschappelijke kennisopbouw stoelt uiteraard niet alleen op data(verwerking) maar vooral op de kennis en inzichten om complexe modellen, numerieke oplossingen en slimme algoritmes te bedenken, ontwikkelen en gebruiken. Dit kunnen we als 'kennisinfrastructuur' zien en deze is onontbeerlijk om de genoemde grote onderzoeksvraagstukken (Hoofdstuk 'Wat de AMW-sector kan doen: samen op missie') aan te kunnen pakken en het onderwijs te versterken. Het delen van deze kennis tussen academische instellingen onderling, en tussen de academische instellingen en de stakeholders en de maatschappij, wordt gezien als een belangrijke opdracht voor de AMW-sector.

Al met al is hiermee een omvangrijke investering in innovatieve observatie- en monitoring-infrastructuur, in de koppeling tussen de data en model-infrastructuur, en in verdere integratie van bestaande infrastructuur op subdomeinen noodzakelijk.

AMW STAKEHOLDERS

Diverse grote bedrijven, kennisinstututen, maatschappelijke organisaties en overheids- en onderwijsinstellingen (Bijlage 2, Figuur 2) zijn, als stakeholders van de AMW-sector, nauw betrokken bij de eerdergenoemde maatschappelijke missies en de daaruit voortkomende AMW-onderzoeksvraagstukken. Voor hun eigen bijdrage aan het aanpakken van de maatschappelijke uitdagingen onderschrijven deze stakeholders de noodzaak van het academische onderzoek én onderwijs dat de AMW-sector nu en in de toekomst te bieden heeft. In het bijzonder wordt door de stakeholders het belang van goede disciplinaire kennis maar ook een van multidisciplinaire aanpak en van geïntegreerde kennis benadrukt.

Relevante vraagstukken waar de AMW-stakeholders zich mee bezig houden liggen op dezelfde vier beleidsthema's als in dit Sectorbeeld (Hoofdstuk 'Waar Nederland voor staat: thema's en maatschappelijke missies'). De stakeholders dragen op deze thema's actief bij aan het vinden van antwoorden op de genoemde maatschappelijke missies, waarvan de meeste,

volgens meerdere stakeholders, nu al, en zeker in de nabije toekomst, een grote mate van **urgentie** hebben. Dat komt ook naar voren uit het feit dat diverse stakeholders betrokken zijn bij het opstellen en uitvoeren van strategische nationale en internationale (kader)programma's op het gebied van onder meer water, energie, klimaat, veiligheid, bodem, biodiversiteit of de circulaire economie.

Energie(transitie), klimaat, milieu, leefomgeving, bodem, water, delta's, ecosystemen, grondstoffen, lucht, recycling, bio en veiligheid zijn maar enkele van de onderwerpen die in deze context door meerdere stakeholders als uitermate relevant benoemd worden, uiteraard afhankelijk van de gebieden waarop die organisaties werkzaam zijn. De **multidisciplinaire** kennis die de stakeholders daarbij nodig hebben en die verkregen kan worden in transdisciplinair onderzoek (co-creatie), doorsnijdt en combineert in verschillende samenstellingen de (sub-)disciplines van de AMW-sector.

Als het gaat om het eigen onderzoek/R&D dat stakeholders uitvoeren op AMW-onderwerpen, geven ze aan waarde te hechten aan **samenwerking met universiteiten** en ook kansen te zien voor het intensiveren daarvan, gericht op de missies en uitdagingen waar Nederland de komende tijd voor staat. Dat kan bijvoorbeeld gaan over onderzoeksvraagstukken op het gebied van klimaatverandering, ecosysteemmonitoring, meteorologie, aardbevingen, biodiversiteit, technologie- en sensor(netwerken)ontwikkeling, energietransitie, duurzaamheid, lucht-, bodem- en waterkwaliteit, ruimtelijke ordening of circulaire economie. Kennisoverdracht en *open science* spelen hierbij een belangrijke rol.

Kenmerkend is dat veel stakeholders het grote belang van (analytisch en numeriek) modelleren en *data science* – en de combinatie daarvan – aangeven, typisch onderwerpen waarvoor de academische AMW-sector veel kan betekenen. Actuele technieken/technologieën op het gebied van IT en digitalisering worden nu al als onontbeerlijk gezien: denk aan bijvoorbeeld geo-informatie, *artificial intelligence*, *datamining*, visualisaties, *machine learning*, *big data* analyse, *remote sensing*, beeldverwerking of sensoren met ingebouwde AI-functionaliteit.

Specifieke modelleer/*data-science* kennis en vaardigheden verwachten de stakeholders over het algemeen ook van AMW-afgestudeerden die daar gaan werken. Specifieke thematisch-disciplinaire ('diepte') AMW-kennis wordt als cruciaal gezien, maar de stakeholders benadrukken bovendien de behoefte aan het multidisciplinair ('breedte') kunnen inzetten van de **academisch gevormde medewerkers**, zeker als het gaat om doorsnijdende onderwerpen als duurzaamheid, circulaire economie, *data science* of klimaat. Dit sluit aan bij het accent hierop zoals dat in dit Sectorbeeld voor de versterking van de AMW-sector wordt gelegd. Vanuit de stakeholders gezien gaat de transdisciplinariteit daarbij verder dan alleen de AMW-disciplines, want er moet ook samengewerkt worden met mensen uit aanpalende sectoren als de biologie, wiskunde, natuurkunde, chemie, informatica, civiele techniek en verschillende alfa en gamma sectoren.

In meer algemene zin wordt ook door veel stakeholders onderkend dat versterking van de samenwerking met universiteiten, niet alleen in onderzoek, maar ook ten aanzien van onderwijs en infrastructuur, bevorderlijk kan zijn voor het aanpakken van de maatschappelijke missies. Een versterkte AMW-sector kan hierin voorzien, of het nu gaat om concrete zaken als stage- en afstudeerstudenten geplaatst bij stakeholders, gastcolleges, benutting van lab- en apparatuurfaciliteiten, of om meer overkoepelende zaken als innovatiecentra, kennisplatformen en nationale en internationale positionering.

De stakeholders scharen zich dan ook achter de plannen beschreven in dit AMW-Sectorbeeld. De AMW-sector en de maatschappelijke stakeholders delen het verantwoordelijkheidsgevoel voor de hier aangegeven problematiek. Het versterken van de organisatie van dit veld levert dan ook een meerwaarde op door een intensievere samenwerking en interactie tussen de academische wereld en de stakeholders, in Nederland maar ook in Europa en mondiaal (Figuur 2). Meerwaarde ten aanzien van de juiste formulering en duiding van de missies en opgaves, en ook ten aanzien van de kennisuitwisseling en bijdrages aan het maatschappelijke debat.

VERSTERKING VAN HET FUNDAMENT NODIG

De AMW-sector is in staat om het hiervoor beschreven **onderzoek**, dat nodig is om de maatschappelijke missies aan te pakken, uit te voeren, en om de door de arbeidsmarkt gewenste **studenten** af te leveren, daarbij gebruik makend van de noodzakelijke **onderzoeksinfrastructuur**. Dat is in het belang van Nederland, van de Nederlandse overheid en de Nederlandse en internationale samenleving.

Dit nieuwe, uitdagende onderzoek speelt zich veelal af op de grensvlakken tussen de verschillende AMW-(sub)-disciplines, waardoor de aandacht sterk uit zal gaan naar multidisciplinair en integraal onderzoek dat in **synergie** wordt uitgevoerd. Dit zal worden vormgegeven door concrete samenwerking in (interuniversitaire/interfacultaire) onderzoeksprojecten en het veel meer gezamenlijk ontwikkelen van onderwijs en onderzoek. Voor deze versterking van het gezamenlijk, integrale onderzoek is een intensivering van de ondersteuning nodig.

Onlosmakelijk verbonden met de versterking van dit multidisciplinaire onderzoek is de doorvertaling daarvan in het academische **onderwijs** op BSc-, MSc- en PhD-niveau. Dat is niet alleen relevant voor de wetenschap zelf en voor de internationale academische positie van de Nederlandse universiteiten. Het is ook gericht op het leveren van afgestudeerden die, met alle kennis en kunde die ze meenemen, op de arbeidsmarkt van de toekomst beter aansluiten op de uitdagingen en activiteiten die volgen uit de maatschappelijke missies en de daarbij behorende multidisciplinaire vraagstukken in Nederland en daarbuiten. De stakeholders hebben het belang hiervan duidelijk aangegeven.

De extra ondersteuningsimpuls voor de AMW-sector, in het bijzonder gericht op geïntegreerd, multidisciplinair onderwijs en onderzoek en de inzet van *state-of-the-art* technologieën, zal een effectieve slag in de nationale organisatie van het veld mogelijk maken. De diverse partijen in de sector, en in aanpalende sectoren daaromheen, zullen beter op één lijn komen. Het profiel van de sector wordt transparanter en sterker, wat weer bijdraagt aan een duidelijker profiel voor de Nederlandse academische wereld in zijn geheel.

De versterkingsimpuls ondersteunt tevens de verbetering van de diversiteit in de sector. Juist op de grenzen en raakvlakken van de verschillende disciplines, waar multi-, inter- en transdisciplinariteit ten volle zichtbaar wordt, speelt diversiteit een essentiële rol, en het zijn met name die gebieden waar de focus van de versterking van de sector ligt. Met het op deze manier versterkte profiel van de AMW-sector kunnen de maatschappelijke missies in volle omvang opgepakt gaan worden. De combinatie van Milieuwetenschappen met Aardwetenschappen is een belangrijk onderdeel van dat profiel en de nieuwe mogelijkheden en kansen die dit oplevert zal de positie van de AMW-sector nationaal en internationaal verder bevorderen.

Alleen door extra versterking kan de AMW-sector, waar ook de student-staf ratio nu al zwaar drukt op de organisaties, de optimale bijdrage leveren aan de aanpak van de maatschappelijke missies, op een manier die van belang is voor heel Nederland. De steeds sneller plaatsvindende veranderingen in het aarde-milieu-systeem, die we de laatste jaren waarnemen, geven deze versterking een grotere urgentie: we kunnen het ons simpelweg niet permitteren het aanpakken van de maatschappelijke missies niet te versnellen/intensiveren.

RESUMEREND

We constateren met zijn allen dat de problematiek op de thema's veiligheid van de leefomgeving, landbouw, water en voedsel, energie(transitie), circulariteit en duurzaamheid, en gezondheid, groot is. De maatschappelijke missies die we moeten aanpakken zijn uitdagend, maar onvermijdelijk. De AMW-sector kan helpen, wil bijdragen aan het ontwikkelen van oplossingen, maar voor de vernieuwingsslag is de huidige capaciteit onvoldoende. De druk op het onderwijs is groot, maar dat onderwijs levert de onmisbare basis voor zowel het uitvoeren van de onderzoeksvraagstukken als de *work force* voor de samenleving. De AMW-sector heeft een goede uitgangspositie opgebouwd, nationaal en internationaal, maar een intensivering van de overheidsinvestering is noodzakelijk om de gevraagde nieuwe weg in te slaan. Het fundament van de AMW-sector moet worden versterkt om de missies aan te pakken.

De noodzaak tot versterking is in het voorgaande slechts in het kort neergezet, alsmede de punten waarop de intensivering van de overheidssteuning zich specifiek zal richten. Dat is ook het doel van dit Sectorbeeld. Al die punten verdienen echter verdere uitwerking en onderbouwing, en daarvoor zal de AMW-sector een uitgebreider Sectorplan gaan ontwikkelen. Wel is duidelijk geworden dat de kernbegrippen hierbij zijn:

- **Waarom:** urgentie van het versterken van het fundament van de AMW-sector voor maatschappelijke missies, en inbedding in (beleids)thema's van/voor samenleving en overheid.
- **Waarnee:** het versterken en verbreden van onderzoek en onderwijs over een breed palet aan onderwerpen van aarde en milieu die ons allemaal raken.
- **Wat is er nieuw:** versterken van het fundament, van het profiel, de organisatie, diversiteit, multi-, inter- en transdisciplinariteit, integratie, gebruik van *state-of-the-art* IT-technologieën.

CONCLUSIE: WE ZIJN ER NOG NIET

Dit Sectorbeeld geeft een overzicht (een 'beeld') van het profiel en de organisatie van de AMW-sector in Nederland en van het belang en de rol van de AMW-sector bij het aanpakken van de verschillende maatschappelijke missies. Om tot dit Sectorbeeld te komen hebben de twee samenstellende gebieden, aardwetenschappen en milieuwetenschappen, de handen ineengeslagen. Deze samenwerking is nieuw en veelbelovend in het zicht van het helpen van de overheid en de maatschappij op belangrijke beleidsthema's, ten behoeve van het waarborgen van een veilige en duurzame samenleving. De sterkte die voortkomt uit een goed georganiseerde aarde- en milieusamenwerking wordt duidelijk uit de beschrijving van de integrale onderzoeksvraagstukken die door de AMW-sector zullen worden opgepakt.

Een versterking van het fundament van de AMW-sector is nodig om de grote uitdagingen van deze tijd en die van de toekomst het hoofd te bieden. De maatschappelijke relevantie van het aangaan van die uitdagingen door het aanpakken van de genoemde missies is evident. De AMW-sector wil bijdragen aan het ontwikkelen van oplossingen voor deze belangrijke vraagstukken. Daarmee wordt waarde gecreëerd voor de – toekomst van onze – samenleving. Bij het bijdragen aan de oplossing van de maatschappelijke vraagstukken zal de focus liggen op een effectieve nationale organisatie en profilering van het veld, versnelling en versterking van nieuw, geïntegreerd, fundamenteel onderzoek op disciplinaire snijvlakken (multi- en transdisciplinair) en op versterking van het academische onderwijs afgestemd op de behoefte van arbeidsmarkt en maatschappij. Om dit te realiseren is een intensivering van de overheidsinvestering in de sector nodig. De maatschappelijke relevantie van de AMW-onderwerpen als klimaat, veiligheid, voedselvoorziening, gezondheid en energietransitie, zoals in het voorliggende Sectorbeeld aangegeven, motiveren deze extra investering bij uitstek. Het is de bedoeling dat het nog te ontwikkelen Sectorplan, dat op dit Sectorbeeld moet volgen, diepgaande onderbouwingen zal leveren ten aanzien van de besteding van de investeringen en de daarmee te bereiken doelen.

DATA

Met bijvoorbeeld meet- en laboratoriumapparatuur wordt veel data ingewonnen. Maar ook zijn er veel statistische en nieuwe *big data*-bronnen voorhanden. Een *up-to-date* IT-infrastructuur is noodzakelijk voor het verwerken en effectief gebruiken van de enorme en groeiende hoeveelheden data. Onderdelen daarvan zijn moderne technologieën voor geavanceerde *data science*, *artificial intelligence* en *machine learning*, *high-performance computing*, *data mining* en *big data analytics*, 3D en 4D visualisatie technieken, maar ook de ontwikkeling van *Digital Twin Earth* modellen.



BIJLAGEN

BIJLAGE 1. PLATFORM AMW

- Appy Sluijs (voorzitter), Universiteit Utrecht
- Mark Bentum, TU Eindhoven
- Marc Bierkens, Universiteit Utrecht
- Mark Huijbregts, Radboud Universiteit Nijmegen
- Carolien Kroeze, Wageningen University and Research
- Harro Meijer, Rijksuniversiteit Groningen
- Herman Russchenberg, TU Delft
- Arnold Tukker, Universiteit Leiden
- Daphne van der Wal, Universiteit Twente
- Guido van der Werf, Vrije Universiteit Amsterdam
- Annemarie van Wezel, Universiteit van Amsterdam

Dit AMW-sectorbeeld was er niet geweest zonder de bijdrage en inzet van:

- Radboud Koop, NSO
- Martijn Deenen, NWO
- Nienke van Liempt, VU

BIJLAGE 2. OVERZICHT STAKEHOLDERS

Wij danken de volgende partijen voor advies en input voor dit beeld van de sector AMW:

- Ministeries OCW, EZK, IenW
- De Watergeuzant
- AWTI
- Deltares
- Differ
- EBN
- Fugro
- KNMI
- Naturalis
- NIOO
- NIOZ
- Nouryon
- NVBM
- PBL
- Red Cross Red Crescent Climate Centre
- RIVM
- Tauw
- Shell
- SodM
- Tennet
- TNO
- VNO-NCW

BIJLAGE 3. INSTRROOM AMW OPLEIDINGEN

Opleiding	Taal	2018-2019 ¹	2019-2020
B Aarde & Economie, VU	NED	48 (0%)	59 (0%)
B Aardwetenschappen, VU	NED	65 (0%)	55 (0%)
B Environmental Sciences, WUR	ENG	77 (32%)	127 (30%)
B International Land and Water Management, WUR	ENG	77 (15%)	73 (15%)
B Soil, Water and atmosphere, WUR	ENG	86 (6%)	83 (6%)
B Milieu-natuurwetenschappen, OU	NED	42 (0%)	43 (0%)
B Global Sustainability Science, UU	ENG	130 (18%)	148 (28%)
B Aardwetenschappen, UU	NED	138 (0%)	148 (0%)
B Future Planet Studies, UvA	NED	178 (0%)	156 (0%)
B Applied Earth Sciences, TUD	ENG	47 (21%)	71 (32%)
B Sustainable Innovation, TU/e	ENG	66 (<1%)	77 (<1%)
M Environmental Resource Management, VU	ENG	80 (60%)	120 (60%)
M Hydrology, VU	ENG	31 (10%)	28 (14%)
M Earth Sciences, VU	ENG	45 (11%)	65 (17%)
M Earth Sciences, UU	ENG	147 (31%)	136 (26%)
M Sustainable Development, UU	ENG	121 (59%)	107 (39%)
M Water Science and Management, UU	ENG	33 (42%)	34 (42%)
M Energy Science, UU	ENG	43 (14%)	29 (38%)
M Sustainable Business and Innovation, UU	ENG	62 (26%)	76 (29%)
M Sustainability Science, Policy and Society, UM	ENG	49 (82%)	75 (84%)
M Environment and Society Studies, RU	ENG	8	7
M Energy and Environmental Sciences, RUG	ENG	50 (40%)	53 (34%)
M Environmental Sciences, WUR	ENG	145 (75%)	196 (62%)
M Urban Environmental Management, WUR	ENG	41 (42%)	60 (42%)
M International Land and Water Management WUR	ENG	53 (20%)	67 (20%)
M Climate Studies, WUR	ENG	32 (30%)	55 (40%)
M Earth and Environment, WUR	ENG	60 (27%)	72 (17%)
M Environmental Sciences, OU	ENG/NED	20 (0%)	20 (0%)
M Industrial Ecology, UL	ENG	85 (55%)	85 (55%)
M Governance of Sustainability, UL	ENG	nvt	53 (35%)
M Earth Sciences, UvA	ENG	31 (38%)	25 (48%)
M Applied Earth Sciences, TUD	ENG	72 (46%)	74 (42%)
M Applied Geophysics, TUD, IDEA League	ENG	25 (76%)	18 (89%)
M Geomatics, TUD	ENG	18 (30%)	17 (30%)
M Sustainable Energy Technology, TUD	ENG	75 (25%)	74 (25%)
M Sustainable Energy Technology, TU/e	ENG	44 (50%)	49 (50%)
M Sustainable Energy Technology, UT ²	ENG	36 (14%)	36 (22%)
M Environmental and Energy Management, UT ³	ENG	37 (78%)	36 (78%)
M Geographical Information Management and Applications, UU, TUD, UT, WUR	ENG	36 (14%)	36 (22%)
M Geo-Information Science and Earth Observation, UT	ENG	87(100%)	104(100%)
M Spatial Engineering, UT	ENG	17 (76%)	22 (68%)
M Civil Engineering and Management, UT ⁴	ENG	44 (16%)	57 (9%)

B = Bacheloropleiding, M = Masteropleiding

¹ Absolute aantallen met tussen haakjes het aandeel internationale studenten in %

² Valt onder sectoren Beta/Techniek en gamma-wetenschappen

³ Valt onder gamma-wetenschappen (Dept Governance and Technology for Sustainability CSTM/BMS)

⁴ Valt deels (MWM track) onder sector AMW, deels onder sector Techniek

BIJLAGE 4. KWALITEITSANALYSE ACADEMISCHE SECTOR AMW

Land/Regio	Totaal aantal publicaties	Citatie ¹ Impact				
EU	685038	1.2				
Verenigde Staten	534283	1.4	Binnen de EU			
China	390212	0.8	% AMW Publicaties ²	Citatie ³ Impact Ranking	% top 1% geciteerde publicaties ⁴	% top 10% geciteerde publicaties ⁴
India	62542	0.7				
Zwitserland	39020	1.8	9%	1	12%	11%
Nederland	53094	1.6	12%	2	14%	13%
Verenigd Koninkrijk	167789	1.5	38%	3	38%	38%
Belgie	22121	1.5	5%	4	5%	5%
Duitsland	160296	1.4	36%	5	31%	33%

1 Veld-gewogen citatie impact (fwci/mncs crown indicator; 1.0 is wereldgemiddelde)

2 Percentage van totale EU-productie

3 Veld-gewogen citatie impact (Nederland is tweede van Europa)

4 Getal hoger dan % AMW Publicaties impliceert hoog aantal toppublicaties

BIJLAGE 5. ACADEMISCHE AMW STAF AAN NEDERLANDSE UNIVERSITEITEN

NATIONAAL

Wetenschappelijk personeel	Personen	FTE	% Vrouw	% 1 ^e GS*	% 2 ^e GS	% 3 ^e GS
Vaste academische staf HGL, UHD, UD, docenten	645	550	28	70%	10%	20%
Tenure Track	63	57	40	89%	6%	5%
Vaste Onderzoekers (geen onderwijs)	61	56	21	47%	6%	47%
Post-docs (gemiddeld over 5 jaar)	285	243	42	19%	35%	46%
PhD (gemiddeld over 5 jaar)**	1151	1074	45	14%	29%	44%
Totaal	2204	1979	39	33%	23%	37%

* Geldstromen (GS) deels niet gespecificeerd tot 1^e, 2^e of 3^e geldstroom

** Zowel werknemers als bursalen; bursalen niet in GS

PER UNIVERSITEIT

Radboud Universiteit Nijmegen

Meegenomen departementen/afdelingen Department Environmental Science (bèta)

Wetenschappelijk personeel	Personen	FTE	Man	Vrouw	% 1 ^e GS	% 2 ^e GS	% 3 ^e GS
Vaste staf HGL, UHD, UD	7.0	6.6	3.8	2.8	100%		
Tenure Track	2.0	1.8	1.0	0.8	100%		
Vaste Onderzoekers (geen onderwijs)	1.0	1.0	1.0		50%	50%	
Post-docs (gemiddeld over 5 jaar)	6.0	6.0	3.0	3.0		30%	70%
PhD (gemiddeld over 5 jaar)	20.0	20.0	10.0	10.0		30%	70%
Totaal	36.0	35.4	18.8	16.6			

Universiteit Groningen

Meegenomen departementen/afdelingen Energy and Sustainability Research Institute Groningen (ESRIG), Integrated Research on Energy, Environment and Society (IREES), Ocean Ecosystems (OE), Geo-Energy (GE)

Wetenschappelijk personeel	Personen	FTE	Man	Vrouw	% 1 ^e GS	% 2 ^e GS	% 3 ^e GS
Vaste staf HGL, UHD, UD	8.0	5.7	3.3	2.4	100%		
Tenure Track					100%		
Vaste Onderzoekers (geen onderwijs)	2.0	1.7	1.7		67%		33%
Post-docs (gemiddeld over 5 jaar)	5.0	4.3	2.6	1.7	35%	35%	30%
PhD (gemiddeld over 5 jaar)*	40.0	40.0	26.0	14.0	5%	8%	15%
Totaal	55.0	51.7	33.6	18.1			

* Financiering dominant van andere bronnen

Universiteit Utrecht

Meegenomen departementen/afdelingen Aardwetenschappen, Sustainable Development, Fysische Geografie

Wetenschappelijk personeel	Personen	FTE	Man	Vrouw	% 1 ^e GS	% 2 ^e GS	% 3 ^e GS
Vaste staf HGL, UHD, UD	117.0	101.2	73.0	28.2	87%	7%	6%
Tenure Track	9.0	8.4	4.8	3.6	100%		
Vaste Onderzoekers (geen onderwijs)	19.0	17.0	13.0	4.0			100%
Post-docs (gemiddeld over 5 jaar)	75.4	60.4	41.6	18.8	15%	34%	51%
PhD (gemiddeld over 5 jaar)	128.4	118.4	64.5	54.0	2%	54%	44%
Totaal	348.8	305.4	196.9	108.6			

Universiteit van Amsterdam, Instituut voor Biodiversiteit en Ecosysteem Dynamica

Meegenomen departementen/afdelingen Ecosystem & Landscape Dynamics (ELD), Evolutionary & Population biology (EPB), Freshwater and Marine Ecology (FAME), Theoretical & Computational Ecology (TCE)

Wetenschappelijk personeel	Personen	FTE	Man	Vrouw	% 1 ^e GS	% 2 ^e GS	% 3 ^e GS
Vaste staf HGL, UHD, UD	41.0	35.7	26.5	9.2	91%	1%	8%
Tenure Track	6.0	6.0	1.0	5.0	100%		
Vaste Onderzoekers (geen onderwijs)	2.0	2.0	2.0		59%		41%
Post-docs (gemiddeld over 5 jaar)	23.0	19.5	9.0	10.5	19%	48%	33%
PhD (gemiddeld over 5 jaar)	34.0	32.2	13.8	18.4	23%	36%	41%
Totaal	106.0	95.4	52.3	43.1			

Vrije Universiteit Amsterdam

Meegenomen departementen/afdelingen Aardwetenschappen, IVM, Milieu en gezondheid

Wetenschappelijk personeel	Personen	FTE	Man	Vrouw	% 1 ^e GS	% 2 ^e GS	% 3 ^e GS
Vaste staf HGL, UHD, UD*	50.0	51.0	36.5	14.5	79%	7%	14%
Tenure Track	15.0	12.3	9.0	3.3	98%		2%
Vaste Onderzoekers (geen onderwijs)	14.5	19.8	15.4	4.4	83%	3%	14%
Post-docs (gemiddeld over 5 jaar)	31.6	39.0	18.3	20.7	18%	40%	42%
PhD (gemiddeld over 5 jaar)	76.0	63.4	31.9	31.5	8%	51%	41%
Totaal	187.1	185.5	111.1	74.4			

* Waarvan 4 docenten, 4 fte (geen onderzoek)

Wageningen University and Research

Meegenomen departementen/afdelingen Natuurwetenschappelijke leerstoelgroepen AMW-WUR, Leerstoelgroepen AMW-WUR (nadruk gamma), Technologische leerstoelgroepen AMW-WUR

Wetenschappelijk personeel	Personen	FTE	Man	Vrouw	% 1 ^e GS	% 2 ^e GS	% 3 ^e GS
Vaste staf HGL, UHD, UD	203.0	160.8	110.2	50.6	20%	25%	55%
Tenure Track							
Vaste Onderzoekers (geen onderwijs)							
Post-docs (gemiddeld over 5 jaar)	76.0	57.2	27.4	29.8	20%	25%	55%
PhD (gemiddeld over 5 jaar)	534.0	517.2	267.0	250.2	20%	25%	55%
Totaal	813.0	735.2	404.6	330.6			

TU Eindhoven

Meegenomen departementen/afdelingen Applied Physics, Electrical Engineering, Industrial Engineering and Innovation Science

Wetenschappelijk personeel	Personen	FTE	Man	Vrouw	% 1 ^e GS	% 2 ^e GS	% 3 ^e GS
Vaste staf HGL, UHD, UD	21.0	13.0	8.0	5.0	100%		
Tenure Track							
Vaste Onderzoekers (geen onderwijs)							
Post-docs (gemiddeld over 5 jaar)	1.0	0.5		0.5		100%	
PhD (gemiddeld over 5 jaar)	17.0	17.0	13.0	4.0	6%	35%	59%
Totaal	39.0	30.5	21.0	9.5			

TU Delft

Meegenomen departementen/afdelingen Water Management, Geoscience and Remote Sensing, Hydrauloc Engineering/oceanography, Geoscience and Engineering

Wetenschappelijk personeel	Personen	FTE	Man	Vrouw	% 1 ^e GS	% 2 ^e GS	% 3 ^e GS
Vaste staf HGL, UHD, UD	62.0	53.7	43.0	10.7	93%	2%	6%
Tenure Track	14.0	13.5	10.0	3.5	68%	18%	14%
Vaste Onderzoekers (geen onderwijs)	9.0	7.5	4.4	3.0	44%	4%	53%
Post-docs (gemiddeld over 5 jaar)	37.0	34.5	27.5	7.0	7%	44%	48%
PhD (gemiddeld over 5 jaar)	79.0	77.4	48.0	29.4	13%	51%	37%
Totaal	201.0	186.6	132.9	53.6			

Universiteit Leiden, Institute of Environmental Sciences (CML)*

Meegenomen departementen/afdelingen Environmental, Biology, Industrial Ecology

Wetenschappelijk personeel	Personen	FTE	Man	Vrouw	% 1 ^e GS	% 2 ^e GS	% 3 ^e GS
Vaste staf HGL, UHD, UD	22.0	20.7	15.1	5.6	77%	8%	15%
Tenure Track	4.0	4.0	3.0	1.0	64%	20%	16%
Vaste Onderzoekers (geen onderwijs)	2.0	1.6	1.6		66%		34%
Post-docs (gemiddeld over 5 jaar)	13.0	8.4	4.0	4.4	20%	21%	59%
PhD (gemiddeld over 5 jaar)	52.0	46.7	29.0	17.7	12%	24%	64%
Totaal	93.0	81.4	52.7	28.7			

* CML is sterk gegroeid in aantal staf en promovendi de afgelopen 5 jaar. In 2020 waren er 75 à 80 promovendi.

Universiteit Twente

Meegenomen departementen/afdelingen Faculteit Geo-Informatie Wetenschappen en Aardobservatie (ITC) (niet inbegrepen UCT/ATLAS), en groep Multidisciplinary Water Management (ET)

Wetenschappelijk personeel	Personen	FTE	Man	Vrouw	% 1 ^e GS	% 2 ^e GS	% 3 ^e GS
Vaste staf HGL, UHD, UD*	114.0	101.3	75.0	26.3	100%		
Tenure Track	13.0	10.9	5.5	5.4	100%		
Vaste Onderzoekers (geen onderwijs)	11.0	4.9	4.7	0.25	58%	36%	6%
Post-docs (gemiddeld over 5 jaar)**	16.8	12.7	8.0	4.8	63%	37%	
PhD (gemiddeld over 5 jaar)***	170.6	141.8	86.2	55.6	13%	5%	5%
Totaal	325.4	271.6	179.3	92.3			

* Waarvan 26 docenten, 23.19 fte (geen onderzoek)

** Geldstromen gebaseerd op huidige cijfers

*** Geldstromen deels niet gespecificeerd

SECTORBEELD 2020

A large, reddish planet with a bright sun and a starry background.

**RUIMTE
VOOR INSPIRATIE**

BEELD VAN
DE NEDERLANDSE
ASTRONOMIE

**DE MELKWEG BOVEN
ESO'S STERRENWACHT
IN PARANAL, CHILI**

De nachtelijke hemel met de Melkweg en twee nabij gelegen kleinere sterrenstelsels, de Magelhaense wolken. Het licht van miljarden sterren, wolken van stof en gas, en gloeiende nevels vormen de witte band van sterren waaraan de Melkweg zijn naam ontleent.



INHOUD

INTRODUCTIE EN SAMENVATTING	56
ORGANISATIE, FOCUS EN PRIORITEITEN	59
GROTE VRAGEN EN UITDAGINGEN VAN DE 21^e EEUW	63
UNIVERSITAIRE ASTRONOMIE	67
AANTALLEN, WERKGELEGENHEID EN KWALITEIT	
IMPACT EN INSPIRATIE	71
CONTINUERING NOVA	75
VERSTEVIGING STAF EN DATA SCIENCE	
BIJLAGEN	76

INTRODUCTIE EN SAMENVATTING

Astronomie betreft de studie van ons universum. De sterrenkunde houdt zich bezig met grote vraagstukken die de mensheid al sinds haar ontstaan hebben geboeid. Waaruit bestaat het heelal? Wat is een zwart gat? Is er leven elders in het universum?³ Het zijn ook de vragen die vanuit de maatschappij vaak naar voren kwamen bij de Nationale Wetenschapsagenda (NWA, 2015), en die jonge kinderen het meest inspireren (ROSE 2010)⁴. Astronomie geeft perspectief op onze plaats in het heelal en de kwetsbaarheid van de kleine planeet waarop wij leven. De antwoorden op deze grote vraagstukken komen in de volgende decennia eindelijk binnen handbereik.

De universitaire astronomie in Nederland is verenigd in NOVA – de Nederlandse Onderzoekschool Voor de Astronomie. In NOVA zijn *alle* universitaire astronomische activiteiten nationaal op elkaar afgestemd. De afgelopen 20 jaar heeft NOVA, dankzij zijn status als top-onderzoekschool met bijbehorend budget, kunnen uitgroeien tot een nieuw virtueel instituut waarin de universitaire onderzoekers hun krachten bundelen in een geïntegreerd promovendi-, opleidings-, onderzoeks-, instrumentatie- en outreachprogramma van wereldklasse. NOVA was daarmee een sectorplan *avant la lettre*. Om de grote bovengenoemde vraagstukken te kunnen beantwoorden hebben Nederlandse astronomen toegang nodig tot moderne telescopen en moeten uiterst gevoelige meetinstrumenten worden ontwikkeld. Astronomie hoort daarom tot de wetenschappen met zeer grote faciliteiten die alleen in internationaal verband kunnen worden gerealiseerd, op aarde en in de ruimte. Dit lukt binnen NOVA doordat er gezamenlijk wordt opgetrokken en scherpe keuzes worden gemaakt. Echter, door het beëindigen van de top-onderzoekschool budgetlijn stopt de financiering voor NOVA eind 2023 en komt de mondiale vooraanstaande positie van de Nederlandse astronomie in gevaar.

Dankzij de combinatie van onderwijs en onderzoek leidt de astronomie hoogwaardige ‘systeemdenkers’ op, die ook de complexe maatschappelijke problemen van deze tijd aankunnen. Het merendeel van de studenten komt in de maatschappij terecht, en slechts een deel vervolgt een carrière in de astronomie. Afgestudeerde astronomen zijn o.a. bij het bedrijfsleven en de overheid zeer in trek bij *data science* en projecten die een multidisciplinaire aanpak vergen. Dit wordt verder versterkt door nieuwe MSc-tracks, gerelateerd aan bijvoorbeeld instrumentatie en *data science*. Astronomische instrumentatie is ook een belangrijke en continue aanjager van kennisontwikkeling en innovatie binnen de *Hightech* industrie.

Recente internationale evaluaties geven NOVA consistent het predicaat ‘exemplarisch’, dat wil zeggen gezamenlijk behorend tot de top vijf instituten in de wereld zoals Cambridge en Princeton (2016 - 2017 evaluatie). De hoge kwaliteit blijkt ook uit het groot aantal prestigieuze beurzen, zoals ERC’s, Spinoza’s en internationale prijzen zoals de Kavli-prijs (de ‘Nobelprijs voor de astrofysica’).

³ The biggest questions in science, Science 2005 en Nature 2018

⁴ Relevance Of Science Education study, Oslo 2010

Een sectorplan astronomie is op dit moment een logische manier om een stabiele langetermijnfinanciering voor NOVA te realiseren. Zonder vervolfinanciering zal de Nederlandse astronomie in een neerwaartse spiraal terechtkomen - een situatie vergelijkbaar met (of zelfs erger dan) die van de natuur- en scheikunde voor 2007. Met name gaan dan de reeds gemaakte investeringen in grote projecten van de afgelopen 20 jaar verloren, met daaraan gerelateerd de internationale toppositie, de reputatie als betrouwbare partner, *Hightech* en *Big Data* werkgelegenheid in Noord-Nederland en het vliegwieleffect voor prestigieuze beurzen in open competitie. Voor zowel de wetenschap als de maatschappij zou dit een groot verlies zijn.

Het sectorbeeld dat hier wordt gepresenteerd stelt de Nederlandse universitaire astronomie verenigd in NOVA in staat haar wetenschappelijk onderzoeks- en opleidingsprogramma op het hoogste internationale niveau voort te zetten. Hiermee kan NOVA haar mondiale leadership behouden, de investeringen die de afgelopen decennia zijn gedaan verzilveren, en op een innovatieve wijze bijdragen aan de grote uitdagingen waarvoor onze maatschappij op dit moment staat.

Namens de Nederlandse universitaire astronomie,
Amina Helmi (RUG), Ewine van Dishoeck (UL) en Ronald Stark (NOVA) -
Directie van NOVA



Amina Helmi,
trekker sectorbeeld astronomie



HIGHTECH INSTRUMENTATIE

Submillimeterontvangers voor de mondiale ALMA-telescopen in het Chileense Andesgebergte, ontwikkeld door de NOVA-instrumentatiegroep in Noord-Nederland.

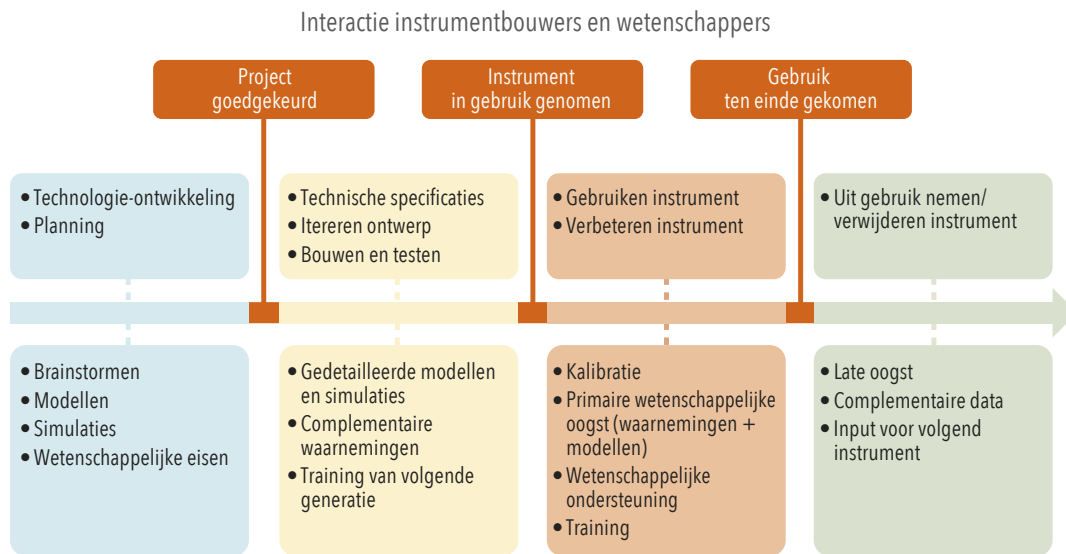
ORGANISATIE, FOCUS EN PRIORITEITEN

Het astronomisch onderzoek en onderwijs aan de universiteiten is sinds 1992 georganiseerd in de onderzoeksschool NOVA, de alliantie van de astronomie-instituten van de Universiteiten van Amsterdam, Groningen, Leiden en Nijmegen. 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. Modern astronomisch onderzoek kan niet aan één faculteit, niet aan één universiteit en zelfs niet door één land alleen worden uitgevoerd. NOVA is ingebed in internationale samenwerkingsverbanden die het onderzoek mogelijk maken en waarmee samen grootschalige infrastructuur gebouwd kan worden. NOVA heeft sinds 1999 financiering van OCW als toponderzoeksschool vanuit de Dieptestrategie. NOVA heeft deze extra financiering aangegrepen om de universitaire astronomie in Nederland in de laatste 20 jaar te coördineren via een gezamenlijk onderzoeks- en instrumentatieprogramma. De keuze op instrumentatie was mede ingegeven door visitatiecommissies die in de jaren '90 het gebrek aan instrumentatie bij de universiteiten – terecht – als een nationale zwakte zagen.

Het NOVA-programma is gebaseerd op een langetermijnstrategie om een aantal van de grootste vragen in de astronomie te adresseren. Cruciaal voor het succes is het aantrekken, ontwikkelen en behouden van talent, en direct daaraan gekoppeld het ontwerpen en bouwen van instrumenten die noodzakelijk zijn voor het onderzoek. Hierbij zijn scherpe en weloverwogen keuzes gemaakt waarop het programma zich concentreert. Wetenschappelijk ligt de focus op drie thema's: (1) Hoe is ons heelal ooit begonnen en hoe is onze Melkweg ontstaan? (2) Wat is de oorsprong van de aarde en onze zon? Hoe bijzonder is onze planeet? en (3) Hoe gedraagt de materie waaruit onze wereld is opgebouwd zich onder de meest extreme fysische omstandigheden? Deze thema's zijn niet statisch maar evolueren continu: spannende nieuwe onderzoeksterreinen zoals donkere materie en donkere energie komen aan bod in thema (1), exoplaneten in (2) en de astrofysica van zwaartekrachtgolffbronnen in (3).

NOVA heeft twee *Hightech* instrumentatiegroepen in Noord-Nederland, de optische-infraroodgroep die gehuisvest is bij ASTRON in Dwingeloo, en de submillimetergroep bij de RUG. In totaal werken er zo'n 20 instrumentalisten, ingenieurs en technici in vaste dienst en 15 in tijdelijk dienstverband. Bij ieder instrumentatieproject zijn meerdere universitaire astronomen nauw betrokken, en er is dus bij alle stadia, vanaf de wetenschappelijke brainstorm tot de eerste waarnemingen met de telescoop, een intensieve samenwerking tussen astronomen en instrumentbouwers (Figuur 3). Deze gezamenlijke aanpak levert de beste positie voor het oogsten van nieuwe ontdekkingen. NOVA en het instrumentatieteam krijgen gegarandeerde waarneemtijd voor de investeringen en krijgen als eerste telescooptijd. Juist daarom zijn in NOVA het instrumentatie- en onderzoeksprogramma sterk geïntegreerd.

FIGUUR 3. LEVENSLOOP VAN EEN HIGHTECH BIG SCIENCE MEETINSTRUMENT



De eerste twee stadia nemen typisch 10-20 jaar in beslag, van eerste idee tot in gebruik nemen van het instrument (blauw-geel). Hierna volgt het wetenschappelijke gebruik met een levensduur van 10-15 jaar (oranje), waarna het instrument vervangen wordt door een exemplaar dat de nieuwste onderzoeksvragen aan kan (groen). De totale looptijd van een instrumentproject is 20-35 jaar. In alle fasen van het project is er een nauwe interactie tussen instrumentatie (boven) en wetenschap (onder de balk).

Qua instrumentatie concentreert de Nederlandse astronomie zich op een beperkt aantal mondiale *high impact* projecten. NOVA fungeert als thuisbasis voor de intergouvernementele European Southern Observatory (ESO), de Europese organisatie voor astronomisch onderzoek op het zuidelijk halfrond. Deze belangrijkste astronomische organisatie in Europa beheert in het noorden van Chili de meest productieve sterrenwacht ter wereld.

Voor NOVA ligt de focus daarom vooral op optische-infrarood- en submillimeterinstrumentatie voor de ESO-telescopen, waaronder de Very Large Telescope (VLT) en de Atacama Large Millimeter Array (ALMA) – hiermee onderscheidt NOVA zich van de NWO-instituten ASTRON (radioastronomie, thuisbasis voor de Square Kilometre Array (SKA) en SRON (ruimteonderzoek, thuisbasis voor de European Space Agency, ESA). Het NOVA-instrumentatiebudget wordt met een factor 2-3 vermenigvuldigd via subsidies verkregen in open competitie zoals de Nationale Roadmap en externe contracten. Momenteel staat ESO's Extremely Large Telescope (ELT), de nieuwe en grootste optische-infraroodtelescoop ter wereld die rond 2026 het eerste licht zal zien, centraal. NOVA heeft daarbij de leiding over de bouw van het mid-infrarood instrument METIS, een van de drie *first-light*-instrumenten op de ELT. Met deze strategie haakt NOVA in op de afspraak die gemaakt is op regeringsniveau dat ESO de telescopen bouwt en beheert, maar dat de instrumenten op deze telescopen en hun financiering de verantwoordelijkheid zijn van de ESO-lidstaten.

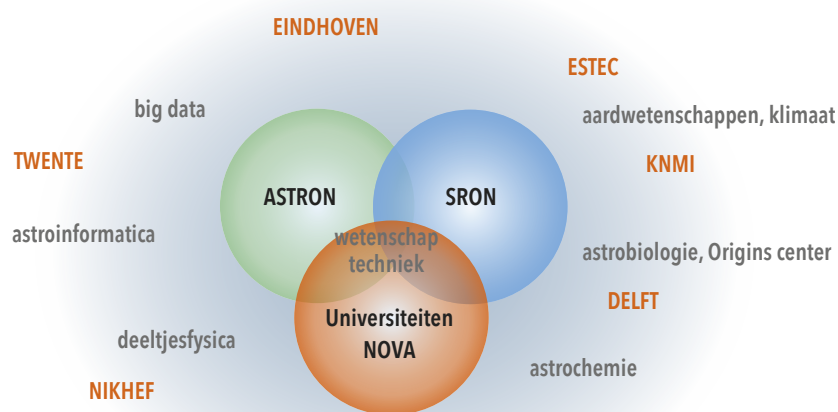
Zoals aangegeven in Figuur 3 zijn de doorlooptijden van instrumentatieprojecten typisch 10-20 jaar, gevolgd door een wetenschappelijke oogstfase van 10-15 jaar. Dit vereist een meerjarenbegroting en stabiele langjarige basisfinanciering. De korte termijn van de NOVA-financiering (tijdelijk en steeds voor vijf jaar) wringt met de lange doorlooptijd van projecten.

Een sectorplan astronomie is op dit moment de enige manier om een stabiele langetermijn-financiering voor NOVA te realiseren als vervolg op tijdelijke financiering vanuit de Diepte-strategie (die stopt in 2023). Zonder NOVA is er geen basisfinanciering voor het cruciale instrumentatieprogramma.

De structurele financiering van NOVA is de hoogste prioriteit in het strategisch plan van de gehele Nederlandse astronomie sinds 2010. Dit wordt vastgesteld in de Raad voor de Astro-nomie (RvdA, voorheen het Nederlands Comité Astronomie), waarin vertegenwoordigers van de astronomische universitaire instituten, NOVA, de NWO-instituten ASTRON en SRON, en NWO-ENW zitting hebben (zie Figuur 4 voor relatie tussen NOVA en de NWO-instituten). De RvdA overlegt over prioriteiten en schrijft ieder decennium een 10-jarig strategisch plan, met tussendoor een *mid-term-update* en een vooruitblik naar het volgende decennium. De natio-nale strategie wordt ook afgestemd met de Europese strategie en roadmap van Astronet (een netwerk van nationale onderzoekfinanciers dat zich bezighoudt met de langetermijnplanning voor de Europese astronomie), waarin Nederland sinds 2005 een belangrijke rol heeft.

Binnen Nederland, en vanuit de astronomie (NOVA, ASTRON en SRON) zijn er wetenschap-pelijke dwarsverbanden met de natuurkunde, informatica, wiskunde, chemie, engineering, biologie en aardwetenschappen, en er wordt samengewerkt met deze afdelingen binnen de universiteiten, de technische universiteiten Delft, Twente en Eindhoven, ESA-ESTEC, TNO-SPACE, het Nikhef-instituut, en met industriële partners zoals VDL ETG. Samen met o.a. de moleculaire biowetenschappen en de aardwetenschappen is in 2016 het *Origins Center*⁵ opgezet voor de studie van de oorsprong en evolutie van leven, planeten en het universum. De hierboven genoemde voorbeelden laten zien dat samenwerking met alle disciplines uit de bèta-sector op een natuurlijke wijze plaatsvindt, zie Figuur 4. Astronomie is prominent aanwezig in de NWA-routes ‘Oorsprong van het leven’ en ‘Bouwstenen van materie en fun-damenten van ruimte en tijd’. De astronomie sluit ook goed aan bij het missiegedreven top-sectoren- en innovatiebeleid, met name sleuteltechnologieën en *data science*.

FIGUUR 4. TEAM-NL: AANPALENDE DISCIPLINES EN INSTITUTEN



Relatie tussen NOVA, ASTRON en SRON ('Team-NL' astronomie) en de interacties met aanpalende disciplines, instituten en universiteiten.

5 <https://www.origins-center.nl/>



GROTE VRAGEN - STERRENSTELSELS

Hubble-opname van de interactie van sterrenstelsels onder invloed van hun zwaartekracht. NOVA onderzoekers buigen zich over de vraag hoe ons heelal ooit is begonnen en hoe sterrenstelsels zijn ontstaan.

GROTE VRAGEN - ZWARTE GATEN

De eerste foto van een zwart gat. Nederlandse astronomen onderzoeken hoe de materie waaruit onze wereld is opgebouwd zich gedraagt onder de meest extreme fysische omstandigheden.

GROTE VRAGEN EN UITDAGINGEN VAN DE 21^e EEUW

NOVA's onderzoeksprogramma 'De levenscyclus van sterren en sterrenstelsels' bestaat uit drie samenhangende thema's die draaien om de belangrijkste vraagstukken in de hedendaagse astronomie. Binnen deze thema's werken de Nederlandse astronomen samen en hebben ze wereldwijd een leidende rol. Hieronder een beknopte beschrijving van de drie thema's en de huidige onderzoeksvragen:

1. Hoe is ons heelal ooit begonnen en hoe is onze Melkweg ontstaan? Sterrenstelsels zijn de bouwstenen van het heelal. Ze bestaan uit verzamelingen van honderden miljarden sterren. Hoe is de Melkweg gevormd, wanneer ontstonden de eerste sterrenstelsels en wat is de aard van de mysterieuze donkere materie en donkere energie?

2. Wat is de oorsprong van de aarde en onze zon? Hoe bijzonder is onze planeet? Nieuwe sterren en planeten ontstaan uit ijle wolken van gas en stof. Hoe gaat dat in zijn werk? Hoe worden de bouwstenen gevormd waaruit aardachtige planeten en leven zijn ontstaan? Zijn er tekenen van leven in de atmosferen van de meer dan 4000 exoplaneten die al ontdekt zijn?

3. Hoe gedraagt de materie waaruit onze wereld is opgebouwd zich onder de meest extreme fysische omstandigheden? De hoogste temperaturen, dichtheden en energieën vinden we in objecten met de grootste zwaartekrachtsvelden: neutronensterren en zwarte gaten. Hoe ontstaan ze en hoe zitten ze in elkaar?

Om deze vragen te beantwoorden zijn niet alleen slimme wetenschappers nodig die samen een bruisend onderzoeksklimaat scheppen, maar ook geavanceerde instrumentatie om steeds verder, scherper en gevoeliger te kunnen kijken. NOVA's motto is daarom:

Top-astronomie = Top-talent + Top-instrumentatie

Nieuwe technologische ontwikkelingen waarmee steeds grotere telescopen uitgerust kunnen worden met steeds gevoeliger meetapparatuur vormen een drijfveer voor de astronomie. Het gaat daarbij om *state-of-the-art* hardware, detectietechnologie en software, en *data science* ten behoeve van de analyse van vaak subtiele signalen (bijvoorbeeld zwakke-zwaartekracht lens-tomografie) en zwakke exotische fenomenen (zoals zwaartekrachtgolven). De NOVA *data science*-teams ontwikkelen *self-intelligent*-informatiesystemen, astrofysische simulaties en *smart analysis*-algoritmen. Nauwe samenwerking tussen de hardware-ontwerpteam, universitaire onderzoekers en *data science*-teams is daarbij van groot belang om een naadloos werkend systeem te creëren van *steel, glass and bits*. Alleen op die manier kan de benodigde nauwkeurigheid voor het astronomisch onderzoek behaald worden. NOVA zet daarom al 20 jaar in op *data science* als integraal onderdeel van haar instrumentatieprogramma.

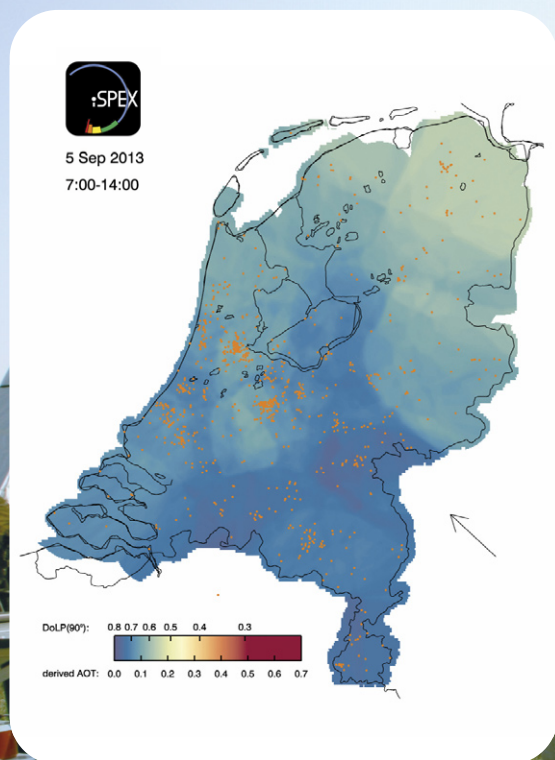
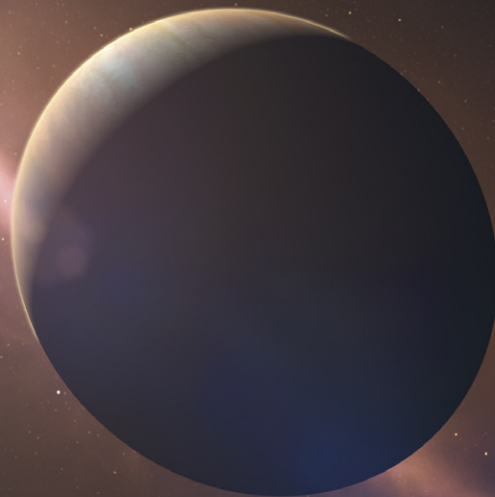
Deze continue *hightech*-ontwikkelingen vinden plaats op het scherpst van de snede en hebben in het verleden geleid tot de ontwikkeling van onder andere de CCD camera, Adaptieve Optiek en WIFI. De basis daarvan is *co-development / shared risk* prototype-ontwikkeling vanuit de astronomie met de industrie over lange tijdspaden (in de orde van grootte van 10 jaar of meer) vanaf wetenschappelijk idee tot toepassing waarmee de industrie nieuwe markten kan aanboren. Hiermee kan een bijdrage worden geleverd aan het oplossen van maatschappelijke uitdagingen, die mondiaal van aard zijn. De Nederlandse astronomie draagt op een actieve wijze bij aan negen van de *Sustainable Development Goals* (SDG's) van de Verenigde Naties (VN). Twee actuele en relevante voorbeelden in de context van het bèta-sectorbeeld zijn:

- **Klimaat.** De recente ontwikkeling door NOVA van hoge-contrastpolarimetrie voor de studie van de atmosferen van exoplaneten, die heeft geleid tot een serie van Spectropolarimeters voor Planetary EXploration (SPEX) instrumenten. Dit is een belangrijke link met de aardwetenschappen en een voorbeeld van succesvolle technologieoverdracht vanuit NOVA naar de industrie.
- **Zorg.** De ontwikkeling van adaptieve optiek (AO), coronografische en polarimetrische technieken ten behoeve van de ELT, leidt tot belangrijke medische *spin-off*. Samen met Nikon Europa is bijvoorbeeld een AO-systeem voor een microscoop ontwikkeld ten behoeve van hoge-resolutiebeeldvorming en *in-vivo* diagnostiek van kankercellen.

NOVA is op dit moment bezig met de bouw van twee instrumenten voor de 39m Extremely Large Telescope (ELT) die in de tweede helft van dit decennium gereed moeten zijn: het heeft de leiding bij het METIS-instrument, en een middelgrote rol bij het camerasysteem MICADO. Daarnaast moet NOVA in 2021 met ESO en internationale partners in gesprek over de volgende generatie ELT-instrumenten, waarvoor tot 2035 gewerkt moet worden aan haalbaarheidsstudies en technologische R&D, voordat tot de bouw wordt overgegaan. Eén van deze instrumenten, EPICS (ExoPlanets Imaging Camera and Spectrograph), is geselecteerd voor de KNAW-Agenda grootschalige onderzoeksfaciliteiten (2016) en zal antwoord kunnen geven op de vraag *Are we alone?* Het antwoord op die vraag zal een enorme impact hebben op veel wetenschapsgebieden en de gehele samenleving.

GROTE VRAGEN – STERREN EN PLANETEN

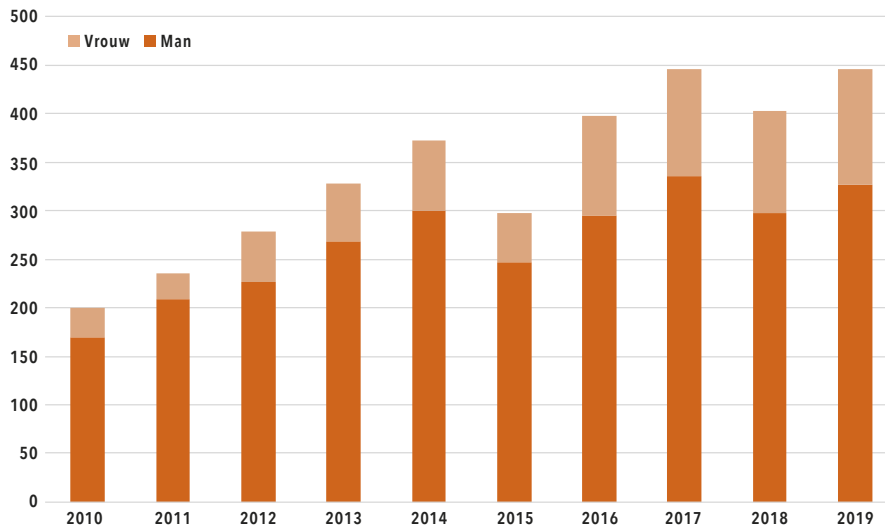
Artistieke impressie van de planeet die om de jonge ster Bèta Pictoris cirkelt. Deze exoplaneet is de eerste waarvan de lengte van zijn dag is gemeten. Nederlandse wetenschappers zoeken antwoord op vragen als ‘Wat is de oorsprong van de aarde en onze zon?’ en ‘Hoe bijzonder is onze planeet?’



iSPEX

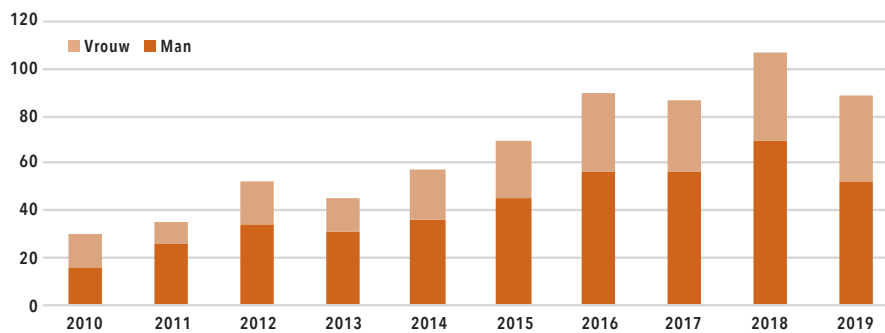
Fijnstof boven Nederland gemeten met iSPEX op smartphones in een *citizen science* programma. iSPEX is een spin-off van innovatieve astronomische instrumentatie ontwikkeld om fijnstof- en wolkdeeltjes in atmosferen van planeten van ons zonnestelsel te meten. Het instrument is onder andere in staat om te zien hoeveel deeltjes er in de atmosfeer zitten, vast te stellen hoe groot ze gemiddeld zijn en chemische eigenschappen te bepalen. Het voorstel voor iSPEX heeft in 2012 de Academische Jaarprijs gewonnen. Er zijn inmiddels veel meer projecten gericht op aardse toepassingen, inclusief iSPEX2.0.

FIGUUR 5. INSTROOM BSc STUDENTEN 2010-2019



Instroom van BSc studenten en vrouw/man verhouding per jaar over de periode 2010-2019. In twee universiteiten is astronomie onderdeel van een Natuur- en Sterrenkunde BSc-opleiding. Het totaal aantal BSc studenten stijgt van 200 in 2010 tot 446 in 2019, een toename met ruim een factor 2. Het aandeel vrouwen verdubbelde van 18% in 2010 tot 36% in 2019. Van alle BSc afgestudeerden astronomie stroomt ongeveer 60% door (gebaseerd op de aantallen in Leiden) naar de MSc in Astronomie.

FIGUUR 6. INSTROOM MSc STUDENTEN 2010-2019



Instroom van MSc studenten en vrouw/man verhouding per jaar over de periode 2010-2019. Het totaal aantal MSc studenten stijgt van 30 in 2010 tot 89 in 2019, een toename met een factor 3. Het aandeel vrouwen bleef gedurende deze periode min of meer constant op het niveau van 45%.

UNIVERSITAIRE ASTRONOMIE AANTALLEN, WERKGELEGENHEID EN KWALITEIT

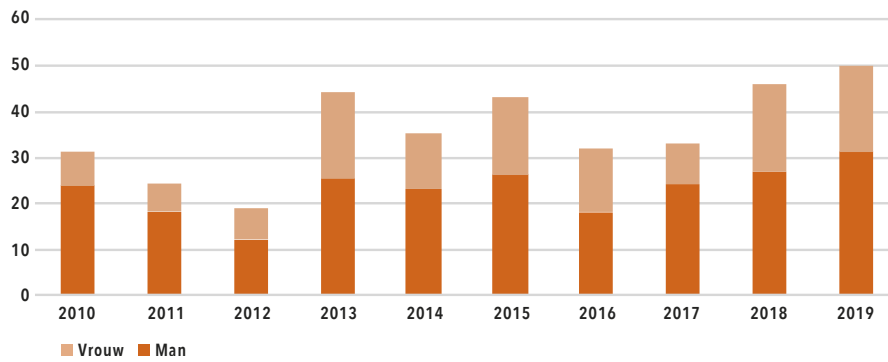
De studie astronomie is een uithangbord voor exacte wetenschappen en inspireert en motiveert jongeren om voor een technische opleiding te kiezen. De universiteiten verenigd in NOVA hebben het opleiden van jonge mensen, onderzoek en het delen van spannende ontdekkingen met het algemene publiek als belangrijk onderdeel van hun missie; zij leveren BSc- en MSc-diploma's en promoties. Nederland behoort tot de toptanden op het gebied van de astronomie en is daardoor een zeer aantrekkelijk land voor toptalent (van studenten tot nieuwe stafleden) uit binnen- en buitenland. De studie astronomie heeft mede daardoor een sterke groei doorgemaakt van het aantal BSc- en MSc-studenten, promovendi en postdocs over de laatste 10-15 jaar (Figuren 5, 6, 7) en draagt zo bij aan de kenniseconomie.

Het rendement van de BSc-opleiding is ongeveer 70% na 4 jaar. Wat opvalt is dat van de vrouwen die aan de studie beginnen een grotere fractie het BSc-diploma behaalt dan van de mannen. Na het BSc-diploma stroomt ongeveer 60% door naar de MSc astronomie en 30% naar een andere bèta MSc-opleiding (zoals natuurkunde, wiskunde, lucht- en ruimtevaarttechniek, milieuwetenschappen).

Alle instituten hebben hun opleidingen aangepast aan veranderingen in de maatschappij met MSc tracks in *data science* en instrumentatie; ook zijn er sterke samenwerkingen met computer science, engineering en AI-afdelingen. Na het MSc-diploma gaat ongeveer 50% door met een promotieonderzoek in de astronomie. Afgestudeerde studenten vinden vrijwel direct goede banen binnen en buiten de astronomie, vooral als *data scientist*. De astronomie levert ook op deze manier een belangrijke bijdrage aan onze moderne maatschappij.

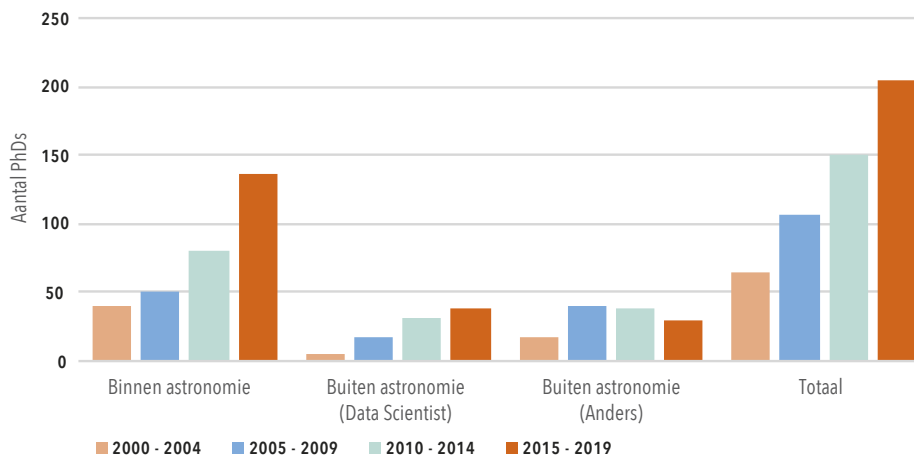
Over de periode 2000-2019 zijn in totaal zo'n 520 PhD-diploma's uitgereikt. NOVA-promovendi (~38% vrouw) vinden allemaal goede posities zowel binnen als buiten de astronomie (Figuur 8). Het percentage promovendi dat een eerste baan vindt in de astronomie ligt rond de 70%. Zij gaan vaak naar topinstituten in het buitenland en de besten komen later weer terug. Na 1 of 2 postdocaanstellingen heeft ongeveer de helft een baan elders in de maatschappij en ook hier vooral als *data scientist*.

FIGUUR 7. AANTAL NOVA PROMOTIES 2010-2019



Het aantal NOVA-promoties per jaar over de periode 2010-2019. Het gaat in totaal om 371 PhD's. Het aandeel vrouwen over deze periode steeg van 22% in 2010 tot 38% in 2019.

FIGUUR 8. AANTAL PhD'S MET BANEN BINNEN EN BUITEN DE ASTRONOMIE



Overzicht van het aantal PhD's met een baan binnen de astronomie en daarbuiten over de periode 2000-2019. Het tijdvak waarin de PhD is behaald is in kleur aangegeven in perioden van 5 jaar.

Tabel 1 laat de ontwikkeling zien van de vaste wetenschappelijke staf binnen de astronomie aan de universiteiten over de laatste 10 jaar. Het aantal vaste stafleden binnen de NOVA-instituten is maar licht gestegen; het aandeel vrouwen in de vaste staf is over de laatste 10 jaar gegroeid van 15% tot 25%. Tegelijk zijn de studentenaantallen gegroeid met factoren 2-3 (Figuren 5, 6) en het aantal PhD's met 60% (Figuur 7). De student/staf verhouding is dus op alle niveaus – van BSc tot MSc en PhD – sterk toegenomen.

TABEL 1. VASTE WETENSCHAPPELIJKE STAF UNIVERSITAIRE ASTRONOMIE

	2011	2013	2015	2017	2019/2020
Amsterdam	10.1 (2.2)	11.5 (2.2)	12.7 (3.3)	14.3 (4.1)	15.9 (4.5)
Groningen	13.3 (3.1)	13.2 (4.0)	13.5 (4.1)	13.9 (5.0)	15.8 (7.0)
Leiden	21.6 (1.9)	19.5 (1.9)	19.3 (2.3)	22.1 (3.0)	23.7 (3.0)
Nijmegen	6.4 (0.8)	10.2 (1.2)	10.0 (1.2)	11.8 (2.3)	11.1 (2.3)
Utrecht	7.0 (1.0)				
Totaal	58.4 (9.0)	54.4 (9.3)	55.5(10.9)	62.1(14.4)	66.5(16.8)
Vrouw/totaal	15%	17%	20%	23%	25%

Aantal fte vaste staf op elk van de NOVA-instituten en het aantal vrouwen (aangegeven tussen haakjes) en de fractie van het totaal, voor de periode 2011 - 2020.

Recente internationale evaluaties geven NOVA consistent het predicaat ‘exemplarisch’, dit wil zeggen gezamenlijk behorend tot de top vijf instituten in de wereld zoals Cambridge en Princeton (2016-2017 evaluatie). De hoge kwaliteit blijkt ook uit het relatief grote aantal ERC Advanced Grants (Bijlage 6, Figuur 9), Spinoza- en internationale prijzen zoals de Kavli-prijs (Bijlage 6, Tabel 2), en uit het succes van promovendi bij het verkrijgen van de meest prestigieuze fellowships wereldwijd. De Kavli-prijs wordt beschouwd als de Nobelprijs voor de astrofysica en is in de periode 2010-2019 slechts vijfmaal uitgereikt. Daarnaast heeft Nederland veel Directeuren-Generaal geleverd aan ESO, en Presidentschappen bekleed van de Internationale Astronomische Unie (IAU), de wereldwijde vakorganisatie waarvan 14.000 astronomen in meer dan 100 landen lid zijn. Deze voorbeelden illustreren de leidende positie van Nederland op het gebied van de astronomie en het succes van NOVA's astronomieprogramma en de financiering als toponderzoekschool.



NOVA MOBILE PLANETARIA

Enthousiaste kinderen na een bezoek aan een van de NOVA mobiele planetaria. Al meer dan 300.000 scholieren in het primair- en voortgezet onderwijs in Nederland hebben een voorstelling in de koepel bijgewoond.

IMPACT EN INSPIRATIE

“Veel nieuwe ontwikkelingen binnen de astronomie hebben een onmiddellijke impact op andere vakgebieden, ook wel de blast radius genoemd: geneeskunde, weer, voedsel, veiligheid, water, energie, materiaalkunde, informatica en chemie vallen duidelijk in die blast radius. Investerings in de astronomie hebben daardoor meteen een bredere impact en een intrinsieke meerwaarde.” Raoul van Engelshoven, managing director IBM Corporation Melbourne, Australië, in de NOVA brochure *Impact & Inspiratie* (2020)⁶.

Naast de eerdere voorbeelden draagt de astronomie vanuit verschillende perspectieven bij aan de maatschappij en de maatschappelijke uitdagingen waar we op dit moment voor staan.

INSPIRATIE EN OUTREACH

Het brede publiek is gefascineerd door de astronomie. De ROSE 2010⁴ studie laat zien dat, alhoewel de interesse van jongeren in wetenschap en techniek laag is, deze groep juist wel een sterke interesse heeft in het heelal, buitenaards leven, supernova's en zwarte gaten. NOVA maakt onderzoeksresultaten via persberichten en directe kanalen voor een breed publiek toegankelijk en betreft het bij astronomische ontwikkelingen. De gezamenlijke inspanningen op het gebied van de sterrenkundevoorlichting in Nederland hebben een bereik van miljoenen mensen op jaarbasis via publicaties in tijdschriften en kranten en zendtijd op radio en televisie. Vrijwel dagelijks krijgen het NOVA informatie Centrum (NIC) en de NOVA-instituten verzoeken voor interviewkandidaten. Het NIC levert vaak ook ideeën voor artikelen en radio- en tv-programma's. Ook wordt nauw samengewerkt met grote tv-producties, zoals 'Heel Nederland kijkt sterren' van Omroep Max – waarvan twee afleveringen alleen al bijna 2 miljoen kijkers trokken – en astronomen zitten regelmatig aan tafel bij de grote talkshows. De IAU100-campagne uit 2019 waarbij elk land op jacht ging naar nieuwe namen voor een exoplaneet en zijn moederster, heeft ook in Nederland tienduizenden mensen, onder wie veel scholieren, aangemoedigd om mee te doen.

De drie mobiele NOVA-planetaria ontvangen sinds 2010 zo'n 30.000 scholieren per jaar. De instituten bereiken op jaarbasis duizenden mensen die – soms voor het eerst – een blik door een telescoop komen werpen op de sterrenkijkdagen die regelmatig worden georganiseerd. Grote nieuwsgebeurtenissen, zoals de eerste ontdekking van zwaartekrachtgolven of de eerste foto van een zwart gat, zorgen voor een gigantisch online bereik op zowel de website astronomie.nl als op social media. De foto van het zwarte gat – Nederlandse astronomen speelden een sleutelrol in dit mondiale samenwerkingsproject – is door het Museum of Modern Art in New York (MoMa) en het Rijksmuseum in de collectie opgenomen.

⁶ <https://nova-astronomy.nl/wp-content/uploads/2020/09/Brochure-NOVA-2020.pdf>

DOCENTEN IN HET PRIMAIR EN VOORTGEZET ONDERWIJS

Er zijn 3400 abonnees op de NOVA-nieuwsbrief en naar schatting is 80% daarvan actief in het primair en voortgezet onderwijs. De jaarlijkse septembermailing naar de 600 natuurkundesecties van de scholen in het voortgezet onderwijs bereikt ongeveer 1200 docenten. Ongeveer 300 docenten hebben nascholing gekregen na de introductie van de Nieuwe Natuurkunde, waarmee de astronomie weer een vaste plek in het curriculum heeft gekregen. NOVA-astronomen en het NIC hebben als coauteur meegeschreven aan de sterrenkundehoofdstukken van nieuwe methodes.

ASTRONOMIE VOOR ONTWIKKELING

Nederland leidt het Europese regionale 'Astronomy for Development' office, dat onderdeel is van een wereldwijd netwerk van de Internationale Astronomische Unie om astronomie te gebruiken voor duurzame mondiale ontwikkeling. De projecten sluiten nauw aan bij de *Sustainable Development Goals* (SDG's) van de VN, met name onderwijs, stimuleren van vrouwen en minderheden in de maatschappij, aandacht voor klimaat en donkere hemel, diplomatie en *global citizenship*.

IT-INDUSTRY, DATA SCIENCE & BIG DATA

Afgestudeerde astronomen zijn onder andere bij het bedrijfsleven en de overheid zeer in trek bij *Big Data* en complexe projecten die een multidisciplinaire aanpak vergen (onder andere KNMI, CBS, ICT-industrie, consultancy, Belastingdienst, financiële sector), vanwege hun vermogen om op 'systeemniveau' te denken. Figuur 8 laat ook zien dat er een verdubbeling is van PhD's die na hun promotie als *data scientist* gaan werken (9% voor PhD's gepromoveerd in de periode 2000-2004, tot 18% voor PhD's gepromoveerd in de periode 2015-2019).

De astronomie heeft te maken met gigantische hoeveelheden data waarvan LOFAR en ALMA de voorlopers zijn. Dat creëert uitdagende data-onderzoeksmogelijkheden. De astronomie houdt zich niet alleen bezig met het innoveren met behulp van *Big Data* maar ook met het innoveren in *Big Data*-technologie. Een voorbeeld daarvan is het multidisciplinaire CORTEX, het Centrum voor Onderzoek in *Real Time* naar het Explosieve Universum, dat kunstmatige intelligentie beter en sneller maakt om zowel samensmeltende sterren beter te bestuderen alsook toepassingen mogelijk te maken in maatschappij en bedrijfsleven. Een ander voorbeeld is de TARGET-samenwerking in Groningen, opgericht met IBM, Oracle en Altran. Inmiddels realiseren bedrijven, waaronder verschillende IT-startups, een omzet van meer dan € 100 miljoen per jaar op basis van *Big Data*-technologie.

PRECISION INDUSTRY

De *return on investment* van het werk van NOVA voor de Nederlandse industrie en economie is aanzienlijk (19 M€ investering in ALMA via het lidmaatschap van ESO, 35 M€ return naar Nederlandse industrie; 48 M€ investering in ELT, tot nu toe gerealiseerde return van ca. 35 M€⁷). Bedrijven werken dolgraag (tegen schappelijk tarief) samen met NOVA omdat dit positief op hen afstraalt en omdat via de opgedane kennis grensverleggende opdrachten voor andere industrie kunnen worden gerealiseerd, bijvoorbeeld voor ASML. De NOVA-brochure *Impact & Inspiratie* (2020)⁶ geeft een aantal voorbeelden uit de praktijk.

7 NOVA persbericht van 18 april 2018 waarin bekend is gemaakt dat ESO en het Nederlandse bedrijf VDL ETG een contract hebben ondertekend voor de levering van de ondersteunende structuren voor de hoofdspiegel van de ELT.



120 m

100 m

80 m

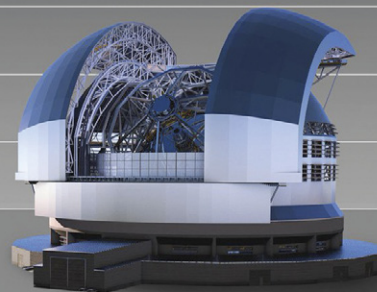
60 m

40 m

20 m



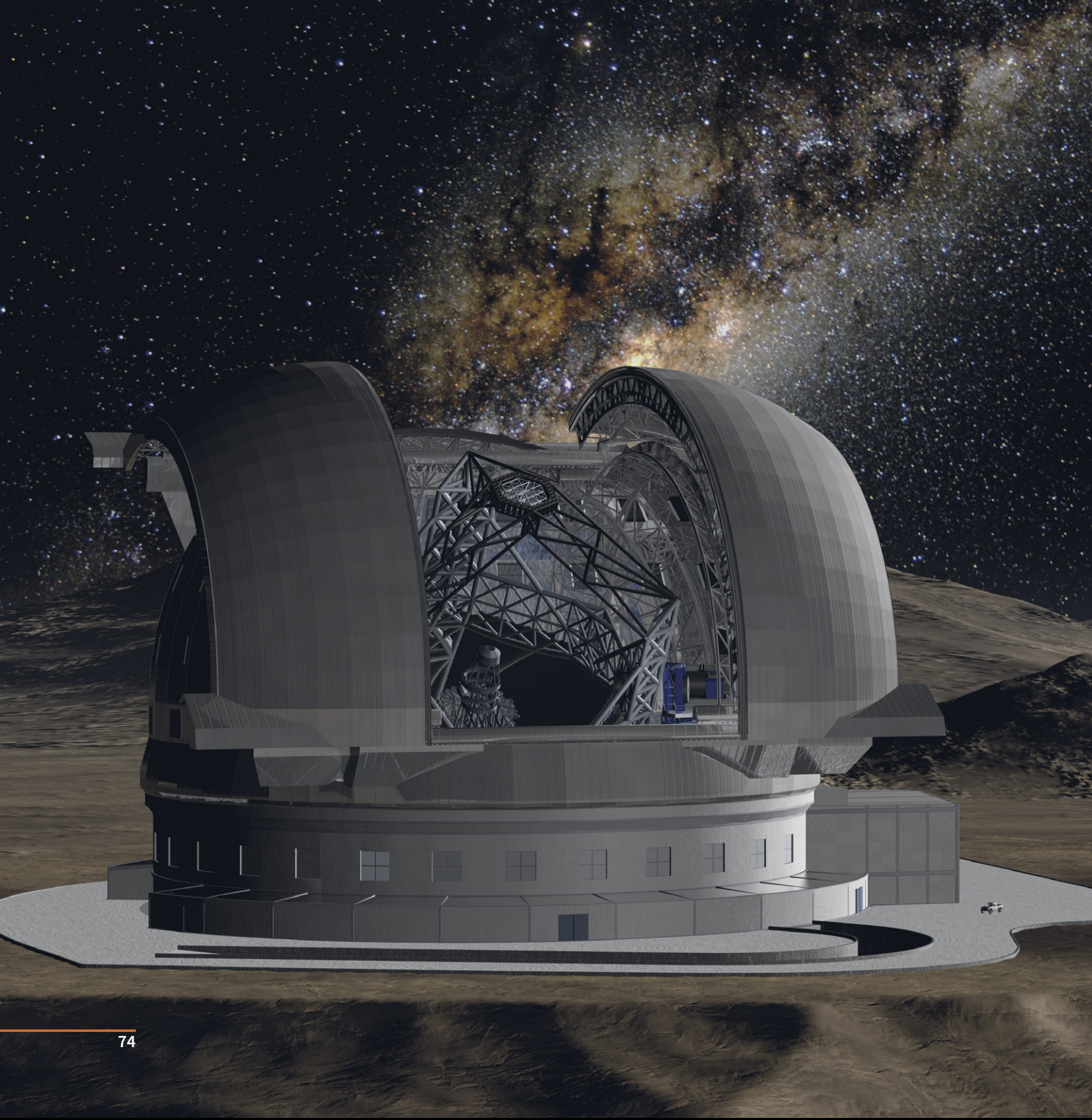
Science Centre NEMO
Netherlands



E-ELT

SAMENWERKING INDUSTRIE

Het Nederlandse bedrijf VDL ETG Projects bouwt de ondersteuningsstructuur voor de hoofdspiegel van ESO's ELT, die in Noord-Chili in aanbouw is. Het ontwerp van de 798 draagstructuren is samen met TNO en NOVA tot stand gekomen. Voor de Nederlandse industrie is de samenwerking met en expertise van NOVA zeer belangrijk om ESO-opdrachten te verwerven.



ESO'S EXTREMELY LARGE TELESCOPE

De nieuwe en grootste optische-infraroodtelescoop ter wereld, ESO's Extremely Large Telescope (ELT), zal in de tweede helft van dit decennium gereed zijn. NOVA heeft de leiding over de bouw van één van de drie first-light-instrumenten, het mid-infrarood instrument METIS en een middelgrote rol bij het camerasysteem MICADO.

CONTINUERING NOVA

VERSTEVIGING STAF EN DATA SCIENCE

Zoals eerder genoemd kan de financiering van NOVA vanuit de Dieptestrategie vanaf 1999 gezien worden als een sectorplan *avant la lettre*. Vanwege deze financiering is de astronomie in 2007 niet opgenomen in het sectorplan natuur- en scheikunde (SNS). De tijdelijke financiering van het SNS-plan is in 2016 omgezet in een structurele financiering. Structurele financiering van NOVA is daarom een logisch onderdeel van het sectorplan van de bètawetenschappen. Het 2016-2017 evaluatierapport van de International Review Board concludeert dat er een structurele financiering moet komen als oplossing voor het tijdelijke en onzekere karakter van de huidige financiering. Voor de universitaire astronomie is nieuwe financiering nodig vanaf 2023, en NOVA moet zich nu al internationaal positioneren en committeren om de astronomie in Nederland aan de wereldtop te houden en de bijbehorende R&D te blijven doen voor toekomstige topinstrumentatie.

De situatie voor NOVA is uniek vergeleken met andere disciplines omdat het al 28 jaar een virtueel instituut betreft voor een lange-termijnsamenwerkingsprogramma op nationaal en internationaal vlak, inclusief instrumentatie. Consolideren en versterken van dit fundament is essentieel voor het oogsten van de investeringen, het wetenschappelijk blijven meedoen aan de wereldtop, het blijven trainen van systeemdenkers en *data scientists* en de integrale aanpak van complexe vraagstukken. Voor een belangrijk deel betreft dit het gezamenlijke onderzoeks- en instrumentatieprogramma. Hiervoor zijn permanente aanstellingen van instrumentatiewetenschappers, ingenieurs en technici, en overlappingsposities voor vaste wetenschappelijke staf essentieel, met daarnaast tijdelijke aanstellingen van promovendi en post-docs voor de drie onderzoeksrichtingen en ondersteuning van de instrumenten (kalibratie, software, etc.). Een kleine maar significante fractie van het budget is voor publieksvoorlichting en educatie.

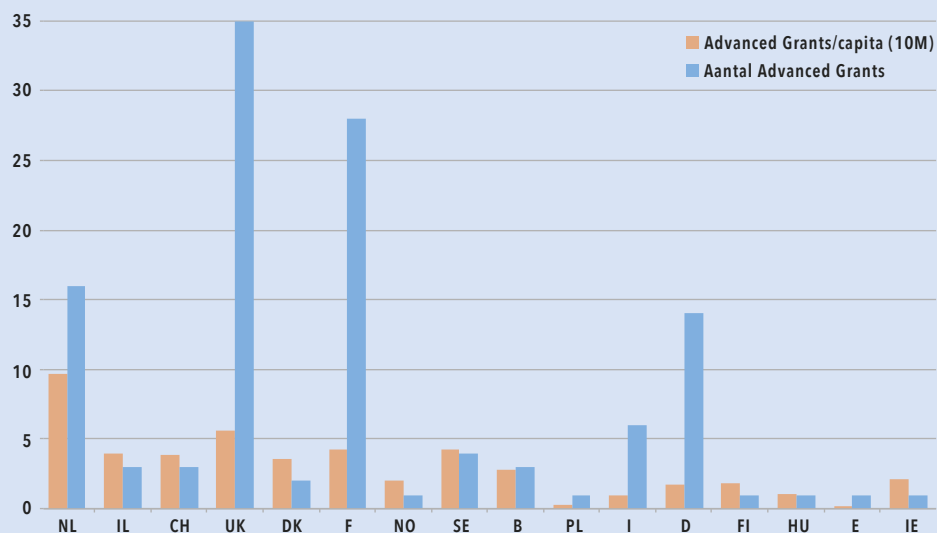
Voor vergroten van de vaste wetenschappelijk staf, zoals in eerdere sectorplannen en andere sectorbeelden, zijn ook bij astronomie sterke argumenten te maken op basis van verder vergroten van de diversiteit en met een factor 2 tot 3 toegenomen studentenaantallen. Het fenomenologische karakter van de astronomie en de complexe data-analysevaardigheden die de studenten ontwikkelen tijdens de studie hebben een aanzuigende werking voor top-talent. Het maakt afgestudeerde studenten ook zeer gewild als *data scientist*.

Een sectorplan astronomie is dus zeer urgent. Het stelt de discipline in staat een leidende rol te houden in internationaal vooraanstaand onderzoek en daardoor enkele van de grootste vragen te beantwoorden die de mensheid sinds haar bestaan boeien. Tegelijkertijd kan het daarmee door training van studenten en impact van het instrumentatie- en *data science*-programma een bijdrage leveren aan een duurzame samenleving.

BIJLAGEN

BIJLAGE 6

FIGUUR 9. ERC ADVANCED GRANTS IN DE ASTRONOMIE



Het totaal aantal toegekende ERC Advanced Grants in de astronomie (PE9) per land over de periode 2008-2019 (blauw), en genormaliseerd per capita (oranje). Merk op dat Nederland na het Verenigd Koninkrijk en Frankrijk de meeste grants heeft (blauw) en per capita (oranje) het hoogste aantal grants heeft gekregen.

TABEL 2. PRIJZEN EN ONDERZOEKSUBSIDIES

Prijs / Grant	Aantal	Nominale omvang (M€)
Kavli*	1	1
Breakthrough**	2	
Spinoza	4	10
Vici	12	18
Vidi	16	13
ERC-advanced	9	22
ERC-starting	12	18
ERC-consolidator	7	14
ERC-synergy	1	14
Totaal		110

Selectie van enkele grote nationale en internationale prijzen en onderzoekssubsidies gewonnen door NOVA onderzoekers over de periode 2010-2019.

* Nobelprijs voor astrofysica

** Ook wel 'de Oscars van de natuurwetenschappen' genoemd

BIJLAGE 7

BIJDRAGEN SECTORBEELD ASTRONOMIE

Het sectorbeeld is geschreven namens de gehele Nederlandse universitaire astronomie door de NOVA-directie. Het is tot stand gekomen met bijdragen van de NOVA-bestuursleden die de vier universiteiten vertegenwoordigen, en van de bètadecanen.

Amina Helmi, Rijksuniversiteit Groningen, NOVA-directie
Ewine van Dishoeck, Universiteit Leiden, NOVA-directie
Ronald Stark, NOVA, NOVA-directie

Huub Röttgering, Universiteit Leiden, NOVA-bestuur
Ralph Wijers, Universiteit van Amsterdam, NOVA-bestuur
Gijs Nelemans, Radboud Universiteit, NOVA-bestuur
Léon Koopmans, Rijksuniversiteit Groningen, NOVA-bestuur
Lutgarde Buydens, Radboud Universiteit, namens de bètadecanen

Saskia Matheussen, NWO, ondersteuning
Marieke Baan, NOVA, ondersteuning

BEELDVERANTWOORDING

p. 53: Artistieke impressie van enkele van de planeten die om de zeer koele rode dwergster TRAPPIST-1 cirkelen. Credit: ESO/M. Kornmesser
p. 54: ESO/P. Horálek
p. 57: Hollandse Hoogte/Studio Oostrum
p. 58: NOVA
p. 62: NASA, ESA, the Hubble Heritage (STScI/AURA) - ESA/Hubble collaboration, and A. Evans (boven); EHT Collaboration (onder)
p. 65: ESO L. Calçada/N. Risinger (boven); iSPEX (onder)
p. 70: NOVA
p. 73: VDL ETG (boven); ESO (onder)
p. 74: ESO

SECTORBEELD 2020

An abstract, glowing blue molecular or network structure composed of interconnected nodes and lines, set against a dark blue background with faint star-like speckles. The structure is dense and complex, resembling a biological or chemical model.

FUNDAMENT VOOR HET LEVEN

BEELD VAN
DE NEDERLANDSE
BIOLOGIE



SLANGENGIFORGANEN IN EEN REAGEERBUIS

Slangenbeten doden ieder jaar meer dan 100.000 mensen en veroorzaken fysieke beperkingen bij meer dan 400.000 mensen. Aan de andere kant is hun gif ook een rijke bron voor medicijnen, die al werd gebruikt door de oude Grieken. Sindsdien zijn veel medicijnen geïnspireerd op componenten uit slangengif, zoals medicijnen die de bloeddruk verlagen en bloedingen voorkomen. Maar zelfs in de moderne geneeskunde is het nog steeds uitdagend om zowel de volledige potentie van slangengif voor medicijnontwikkeling te benutten als mensen te beschermen tegen zijn dodelijke effecten. Momenteel zijn biologen in staat miniversies van organen in het lab te kweken, zogenaamde organoïden. Ze verzamelden gifklieren van negen verschillende slangen waaruit ze deze organoïden probeerden te kweken om zo tegengif of geheel nieuwe medicijnen te ontwikkelen. Een sterk voorbeeld van de potentie van de aanwezige biodiversiteit in de natuur en hoe die te gebruiken voor de productie van nieuwe medicijnen.

INHOUD

MANAGEMENTSAMENVATTING	82
TEN GELEIDE	85
BIOLOGIE ALS BASIS VOOR EEN GEZONDE WERELD	87
VERGROTEN, VERSNELLEN, VERBREDEN	91
AMBITIE EN MISSIES	92
BENODIGDE BIOLOGISCHE KENNIS	95
BOUWSTENEN VAN HET LEVEN	95
INTERACTIES TUSSEN EN BINNEN CELLEN	96
BOUWEN MET BIOLOGIE	96
AANPASSING EN EVOLUTIE	96
VAN GENOOM TOT INDIVIDUELE EIGENSCHAPPEN	97
AANPASSING AAN EEN SNEL VERANDERENDE WERELD	97
INTERACTIES TUSSEN MACRO- EN MICRO-ORGANISMEN	97
VAN ECOSYSTEEMPROCESSEN NAAR BIODIVERSITEIT	98
VOORSPELLEN VAN DE VEERKRACHT VAN ECOSYSTEMEN	98
OVERGANG NAAR DUURZAME LANDSCHAPPEN	98
DOOR DE MENS GECREËERDE ECOSYSTEMEN	101
VERNIEUWENDE TECHNOLOGIE: DATA-ANALYSE EN GEAVANCEERDE METHODEN	101
SINGLE-CELLTECHNOLOGIEËN	101
NIEUWE IMAGING-TECHNIEKEN	102
KUNSTMATIGE INTELLIGENTIE	102
ORGANISATIE EN IMPACT VAN DE BIOLOGIE	105
BIOLOGIE ALS KERNDISCIPLINE	105
LANDELIJKE ORGANISATIE	105
HET NATIONALE PROFIEL	106
KWALITEIT NEDERLANDSE BIOLOGIE	107
MAATSCHAPPELIJKE EN ECONOMISCHE IMPACT	109
ACADEMISCH BIOLOGIE-ONDERWIJS EN WERKGELEGENHEID	113
INSTROOM EN KWALITEIT	113
WERKGELEGENHEID VOOR BIOLOGEN	115
BEHOEFTE VAN WERKGEVERS	116
HOE KAN DE BIOLOGIE DE UITDAGINGEN AAN?	119
STEVIGE UITGANGSPOSITIE	119
DE TOEKOMST	120
BIOLOGISCHE KENNIS ALS VLEIENDE WIEL VOOR SOCIO-ECONOMISCHE INNOVATIES	120
VERNIEUWENDE TECHNOLOGIE EN INFRASTRUCTUUR	121
TALENT AANTREKKEN EN BEHOUDEN	121
VERLAGEN STUDENT/STAF-RATIO	122
BETERE EXPERTS DOOR BETERE OPLEIDINGEN	122
BIJLAGEN	125

MANAGEMENTSAMENVATTING

Pandemieën, voedseltekorten, de gevolgen van milieuvuiling en klimaatverandering voor de landbouw en de achteruitgang van de diversiteit aan soorten op onze aarde: voor deze grote uitdagingen is fundamentele kennis vanuit de biologie cruciaal. Er is inzicht en overzicht nodig van complexe systemen met vele lagen van interacties en systeemkennis op verschillende schaalniveaus, van het niveau van virussen, DNA en cellen tot aan dat van organismen en ecosystemen. Nooit eerder was het zo urgent om het leven te begrijpen. Door het versnellen en verbreden van fundamenteel biologisch onderzoek en het daardoor vergroten van onze biologische kennis, kunnen we de grote uitdagingen van onze tijd sneller het hoofd bieden.

Of we nu ernstige ziektes willen bestrijden, de stikstofuitstoot willen reduceren, biodiversiteit willen bevorderen of plagen en ziekten in de veehouderij en landbouw willen bestrijden: fundamenteel onderzoek naar alle facetten van het leven vormt steeds de essentiële onderbouwing voor rationele en socio-economisch verantwoorde keuzes⁸. De biologie verbindt bètadisciplines als de chemie, fysica en informatica; de farmaceutische wetenschappen, aard- en milieuwetenschappen en de landbouwwetenschappen; en heeft duidelijke raakvlakken met de medische wetenschappen, sociale en gedragswetenschappen en de technische wetenschappen. Biologie heeft een centrale positie in het Nederlandse bètalandchap. Het is een discipline met diffuse randen en een kloppend hart. Het is niet voor niets dat veel van de interdisciplinaire vakgebieden beginnen met het voorvoegsel 'bio', zoals biofysica en biochemie. Bovendien levert de biologie een kernbijdrage aan veel interdisciplinaire opleidingen.

De Nederlandse biologie is van wereldkwaliteit en heeft een uitstekende uitgangspositie om een voortrekkersrol te spelen in het verder vergroten van onze biologische kennis. Dit is hét moment om hierin te investeren: we leven in een tijd waarin het arsenaal aan technologische mogelijkheden om de werking van levende organismes te bestuderen elke dag groeit (denk aan *single-cell genomics*, *cell imaging*, *gene-editing* zoals CRISPR-Cas, *remote sensing*). Met deze revolutionaire nieuwe technologieën kunnen we grote fundamentele ontdekkingen doen om het leven beter te begrijpen, kunnen we biologische kennis ontsluiten én zo de maatschappelijke uitdagingen het hoofd bieden.

Investeren in biologische kennisontwikkeling via een integraal sectorplan is van groot belang. Zo is het nodig om meer talentvolle wetenschappers aan te stellen die onze expertise vergroten en de nieuwe kennis en vaardigheden verankeren in de opleiding van een nieuwe generatie biowetenschappers. Een belangrijk onderdeel van dit plan is de verlaging van de buitenproportioneel hoge student/staf-ratio van de Nederlandse biologie-opleidingen

⁸ <https://www.mckinsey.com/industries/pharmaceuticals-and-medical-products/our-insights/the-bio-revolution-innovations-transforming-economies-societies-and-our-lives#>

Door het versnellen en verbreden van fundamenteel biologisch onderzoek kunnen we de grote uitdagingen van onze tijd sneller het hoofd bieden.

om de kwaliteit van het onderwijs te kunnen waarborgen. Om nieuwe kennis te kunnen genereren zal daarnaast geïnvesteerd moeten worden in hoogwaardige instrumentatie en infrastructuur.

Om investeringen in de biologie structureel te laten renderen zijn innovaties in het onderwijs onontbeerlijk. Zo is er een sterke behoefte aan dynamische en vernieuwende curricula die optimaal aansluiten en mee-evolueren met de noden van de werkgevers van biologen. De snelle maatschappelijke en technologische veranderingen vragen om biowetenschappers die, in aanvulling op fundamenteel biologische kennis, ook diepgravend inzicht hebben in data-analyse, bioinformatica, modelleren, kunstmatige intelligentie, soorten- en veldkennis, en ondernemerschap. Tenslotte moeten de biologen van de toekomst niet alleen een stevige disciplinaire basis hebben, maar ook in staat zijn om te werken in multidisciplinaire, interdisciplinaire en transdisciplinaire teams.

Wanneer de overheid nú investeert in het vergroten van fundamenteel biologische kennis, zal dit in belangrijke mate bijdragen aan het missie-gedreven innovatiebeleid van de overheid, de vragen en routes uit de Nationale Wetenschapsagenda, de agenda van de Europese *Green Deal* en de opdrachten geformuleerd in de *Sustainable Development Goals*. Dit is het uitgelezen moment om een versnelling in biologische ontdekkingen te realiseren die zal leiden tot meer welvaart en welzijn en tot een meer duurzame samenleving.



GEWASSEN VOOR DE TOEKOMST

De wereldbevolking groeit naar verwachting tot 9 miljard mensen in 2050. Dat betekent dat we hoogwaardig voedsel moeten produceren, en dat de opbrengsten van onze huidige gewassen omhoog moeten, op een verantwoorde en duurzame manier. Gewassen voor de toekomst moeten met minimale input (van water, meststoffen en beschermingsmiddelen tegen ziekten en plagen) maximale output leveren, zelfs als ze geteeld worden onder niet-optimale omstandigheden zoals op dorre, verzilte gronden, bij droogte en hitte. Biologen hebben recent eigenschappen in planten geïdentificeerd die gewassen beter bestand maken tegen droogte en/of zout. Door bestaande rassen aan te passen kunnen ze met minder input toch een aanzienlijke productie opleveren. Daarnaast richten biologen zich op veredeling van wilde planten met veel potentie voor duurzame teelt en voedselproductie, zoals quinoa. Met de huidige kennis kunnen veredelaars deze veelbelovende planten snel geschikt maken als gewas voor de toekomst.

Foto: Verschillende rijstvariëteiten die getest worden op hun overstromings-tolerantie.

TEN GELEIDE

Eind 2018 leverde kwartiermaker Bert Meijer een plan op voor de Nederlandse academische bètasector, gericht op de informatica, natuurkunde, scheikunde en wiskunde⁹. In dat document werd ook gepleit voor investeringen in de biologie, met de uitnodiging aan het veld om een integraal beeld van het onderzoek in de biologie in Nederland op te stellen. Dit sectorbeeld ligt nu voor u. Het is opgesteld door een taskforce (zie bijlage 8), die alle algemene universiteiten met een biologiedepartement en Wageningen University vertegenwoordigt, onder leiding van prof. dr. Rens Voeselek, in nauw overleg met NWO, de KNAW en de biologische onderzoeksinstituten (bijlage 9).

In afstemming met de bètadecanen is besloten dat dit sectorbeeld zich beperkt tot de biologie zoals uitgevoerd aan de universiteiten met een funderende biologie-opleiding en de biologie-instituten van NWO, KNAW en Naturalis. Kenmerkend voor het onderzoek binnen deze instellingen is dat het veelal fundamenteel en exploratief van aard is, een brede en solide basis legt voor toegepast onderzoek en dat deze instellingen gezamenlijk een belangrijke taak vervullen in de opleiding van de toekomstige generatie biologen. De taskforce realiseert zich dat net zoals de diffuse randen van de discipline biologie, er ook geen scherpe scheidslijn is met biologisch onderzoek en biowetenschappelijk onderwijs zoals dat ook wordt uitgevoerd door onderzoekers die verbonden zijn aan de faculteiten Farmacie, Natuurkunde, Scheikunde, Geowetenschappen en Diergeneeskunde, en aan de academische ziekenhuizen en medische faculteiten van de algemene universiteiten (inclusief Erasmus Universiteit Rotterdam), de technische universiteiten van Delft, Eindhoven en Twente, TNO, de Wageningen Research instituten en binnen de R&D-afdelingen van het bedrijfsleven (zie figuur 10). Het is evident dat de reikwijdte van het biowetenschappelijk onderzoek in Nederland zeer groot is. Nederland heeft op dat gebied veel in huis en dat biedt kansen.

De nationale samenwerking en profilering binnen de Nederlandse biologie is al eerder beschreven door de KNAW: in 2001 in 'Biologie, een vitaal belang'¹⁰ en in 2011 in 'Strategische verkenning Nieuwe Biologie'¹¹. Dat laatste rapport maakt zichtbaar welke consequenties fundamenteel biologisch onderzoek heeft voor ons dagelijks leven en welke kansen het biedt voor de Nederlandse kenniseconomie.

Het voorliggende sectorbeeld beschrijft de stand van zaken binnen het Nederlandse wetenschappelijke domein biologie in 2020 en schetst een breed gedragen toekomstvisie voor het vakgebied. De biologie aan universiteiten en onderzoeksinstituten in Nederland is van uitstekende kwaliteit en heeft een sterke internationale positie. Om aan de top te blijven en beter in te spelen op maatschappelijke uitdagingen is vernieuwing en versnelling nodig.

9 Een nieuw fundament: beeld van de bètasector, januari 2019.

10 Biologie: een vitaal belang, KNAW 2001 (www.knaw.nl/nl/actueel/publicaties/biologie-ee-vitaal-belang)

11 Strategische verkenning nieuwe biologie; het kloppend hart van de life sciences, KNAW 2011 (www.knaw.nl/nl/actueel/nieuws/knaw-rapport-over-de-nieuwe-rol-van-de-biologie)

FIGUUR 10: ECOSYSTEEM VAN DE NEDERLANDSE BIOLOGIE

Biologisch wetenschappelijk onderzoek in Nederland wordt uitgevoerd aan veel verschillende instellingen. De figuur toont in de binnenste cirkel de universitaire instellingen die dit sectorbeeld schreven, samen met de nationale biologie-instituten (tweede cirkel). In de derde cirkel staan de instellingen waar ook biologisch onderzoek plaatsvindt. De discipline biologie kenmerkt zich door diffuse randen en sterke samenwerking.



Dit rapport belicht de toekomstige ontwikkelingen in de biologie en beantwoordt de vraag hoe biologische kennis bijdraagt aan het aanpakken van grote maatschappelijke uitdagingen. Daarnaast geeft het aan welke investeringen nodig zijn om de noodzakelijke biologische kennis in Nederland te vergroten, door onderzoek te versnellen en te voorzien van de brede basis aan experts en onmisbare technologie.

De taskforce heeft voor het opstellen van dit sectorbeeld dankbaar gebruik gemaakt van de informatie en feedback die we mochten ontvangen van NWO, de NWO-tafel Levenswetenschappen en haar werkgemeenschappen, het Nederlands Instituut voor Biologie (NIBI), het Rathenau Instituut, de bètadecanen, het afstemmingsoverleg Biologie, de KNAW-sectie Biologie, de directeurs van de biologische onderzoeksinstituten en diverse collega's in het land.

Met deze omvangrijke afstemmingsoperatie en de inzet van velen is het beeld van de biologie dat nu voor u ligt tot stand gekomen.



Namens de taskforce,
Rens Voesenek

BIOLOGIE ALS BASIS VOOR EEN GEZONDE WERELD

Een versterking van de fundamentele kennis van de biologie is cruciaal voor het aanpakken van de grote uitdagingen waarvoor onze nationale en mondiale samenleving zich gesteld ziet. Hoe zorgen we ervoor dat onze **voedselvoorziening** in de toekomst duurzaam en betrouwbaar is? Hoe kunnen we **gezond** langer leven en hoe dringen we welvaarts- en ouderdomsziekten en verhoogde risico's van infectieziekten terug? Hoe roepen we de dramatische achteruitgang van onze **leefomgeving** en de **biodiversiteit** een halt toe? En hoe beperken we de schadelijke effecten van **klimaatverandering**? Deze uitdagingen zijn een direct gevolg van de almaar groeiende wereldbevolking en onze toenemende welvaart. We zijn ons ervan bewust dat de huidige exploitatie van onze planeet niet duurzaam is en zo niet door kan gaan. De oplossingen voor deze uitdagingen zijn complex en kunnen alleen bereikt worden met fundamenteel, interdisciplinair onderzoek.

Fundamentele biologische kennis vormt een onmisbare schakel in de onderbouwing van veel socio-economische keuzes. De grote maatschappelijke uitdagingen illustreren de noodzaak om de levende natuur beter te begrijpen. Van een virus tot de mens, van de werking van een enkel gen of eiwit tot de complexiteit van het brein, van het immuunsysteem of van een ecosysteem: er is diepgaande kennis nodig van de complexe biologische systemen die ons lichaam en de wereld vormen, en het was nog nooit eerder zo urgent als nu. Biologie is de studie van het leven en van complexe systemen, met veel lagen van interactie en veel lengte- en tijdsschalen. Dit is de kern van de biologie, die zich verder kenmerkt door diffuse randen waar veel interdisciplinaire samenwerking plaatsvindt. Het is niet voor niets dat veel van de in de afgelopen decennia ontstane nieuwe interdisciplinaire vakgebieden beginnen met het voorvoegsel bio: denk aan biofysica, biochemie, biomedische wetenschappen en bionanoscience.

De biologie kan in de nabije toekomst onze wereld ingrijpend verbeteren en zal bijdragen aan de verduurzaming van onze welvaart en ons welzijn. Het is niet voor niets dat Z.M. koning Willem-Alexander tijdens zijn kersttoespraak van 25 december 2019 aangaf dat biologen een sleutelrol vervullen in het behoud van de Nederlandse welvaart, en dat belangrijke wereldleiders en de Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD) de 21^e eeuw typeren als de eeuw van de biologie: biologische kennis is onmisbaar om de maatschappelijke uitdagingen van de 21^e eeuw op te lossen. Tijdige investering in fundamenteel onderzoek kan voorkomen dat later veel grotere investeringen nodig zijn om de schade van onvoldoende kennis te beperken. Een schrijnend voorbeeld is de gebrekkige kennis van de biologie van het SARS-CoV-2 virus en de dramatische gevolgen daarvan. Nu zien we, om met de woorden van minister-president Rutte te spreken, dat bestuurders met slechts 50 procent van de noodzakelijke kennis 100 procent van het probleem moeten oplossen. Het is de ambitie van de Nederlandse biologie om de noodzakelijke biologische kennisopbouw met gerichte investeringen te versnellen en samenwerking met aangrenzende

sectoren te versterken, zodat de overheid kan beschikken over meer dan 50 procent van de noodzakelijke kennis en zo snel kan inspelen op de grote uitdagingen van deze tijd.

Om de huidige maatschappelijke uitdagingen op te lossen is meer en betere systeemkennis nodig van het functioneren van cellen, organismen en ecosystemen, in wisselwerking met hun omgeving. Een paar voorbeelden:

Kennis van moleculaire en cellulaire processen, ons immuunsysteem, het microbiom (micro-organismen zoals bacteriën, gisten en schimmels die in en op ons lichaam leven) en onze hersenen staat aan de basis van preventieve en klinische gezondheidszorg voor **welvaarts- en ouderdomsziekten** zoals Alzheimer, kanker, overgewicht en hart- en vaatziekten. Daarnaast is ook meer kennis van de evolutiebiologie nodig om te begrijpen, en daarmee in de toekomst hopelijk ook te voorspellen, hoe en wanneer **nieuwe infectieziekten** evolueren, hoe kankercellen zich gedragen en hoe we effectief met antibiotica moeten omgaan.

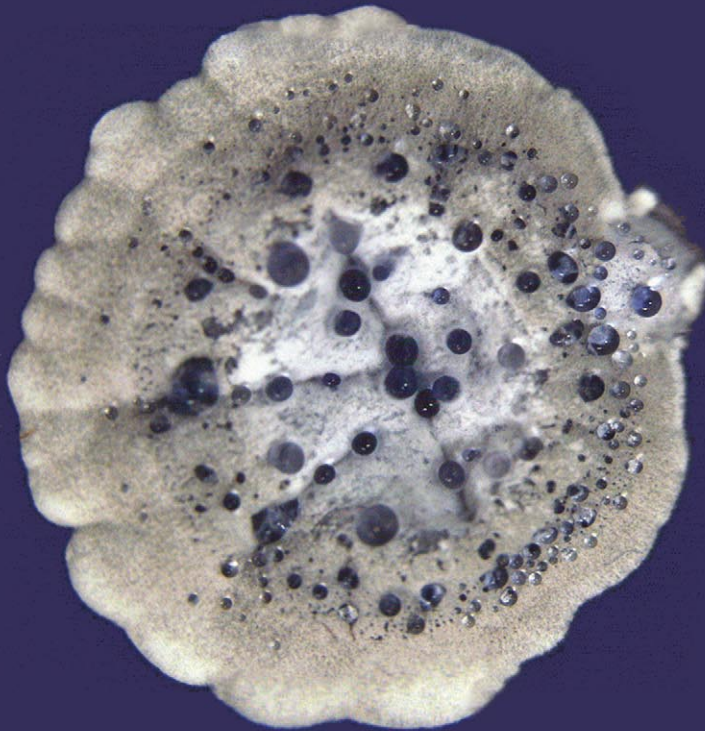
Met nieuwe veredelingsinzichten en een beter begrip van de fysiologie van planten en dieren in combinatie met slimme technologieën kunnen we meer voedsel produceren met minder land en water. Met meer diepgaande kennis van plantenbiologie kunnen we gewassen aanpassen aan extreme omstandigheden als hoge temperatuur, persistente droogte en veelvuldige overstromingen, die ontstaan als direct gevolg van de razendsnelle verandering van ons **klimaat**. In samenwerking met bijvoorbeeld milieuwetenschappers, economen, gedragswetenschappers en het bedrijfsleven draagt biologisch onderzoek bij aan verlichting van de enorme druk op onze **leefomgeving** en het veiligstellen van een duurzame **voedselvoorziening** voor de toekomst.

Fundamentele ecologische kennis van de interacties tussen organismen in ecosystemen is onmisbaar om de dramatische afname van de **biodiversiteit** te stoppen en de capaciteit tot aanpassing van organismen aan antropogene invloeden te begrijpen en te voorspellen. Daarnaast is deze kennis nodig bij het restaureren van de natuur, het veiligstellen van essentiële ecosystemediensten voor economie en maatschappij en het voorkomen van ziektes en ongecontroleerde en ongewenste populatiegroei van organismen zoals de teek en de eikenprocessierups. Meer onderzoek naar biodiversiteit stelt ons ook in staat om nieuwe organismen te ontdekken die biologisch actieve moleculen produceren die bijvoorbeeld bacteriën kunnen doden of kanker kunnen remmen. Op dit moment kennen we nog maar 15 procent van alle soorten op onze planeet. Het nog niet ontdekte deel is een enorm reservoir aan potentiële kandidaten voor de ontwikkeling van bijvoorbeeld nieuwe medicijnen.



OP ZOEK NAAR ÁL HET LEVEN

Stel dat je naar een symfonieorkest luistert, maar alleen de blazers kunt horen. Onacceptabel, toch? Met de natuur is net zo iets aan de hand. Na ongeveer 200 jaar zoeken kennen we nu 2,2 miljoen verschillende soorten. Dat lijkt veel, maar dat is maar 15 procent van de 15 miljoen soorten die op aarde leven. Daardoor hebben we een heel beperkt beeld van de natuur. Willen we echt begrijpen hoe de natuur functioneert en hoe met de klimaatverandering en de biodiversiteitscrisis om te gaan, dan is het essentieel om alle soorten te kennen en te begrijpen hoe ze met elkaar samenhangen. Gelukkig kunnen biologen met nieuwe genetische, camera-, akoestische, radar- en LIDAR- (Laser Imaging Detection And Ranging) technieken nu snel soorten herkennen en classificeren. Zo kunnen we ál het leven in kaart brengen en veranderingen in soortensamenstellingen monitoren, zodat we voor het eerst het hele orkest van het leven kunnen horen.



SLAPENDE ANTIBIOTICA

Er is geen klasse van medicijnen die een grotere bijdrage heeft geleverd aan de volksgezondheid dan de antibiotica (Nobelprijzen 1945 en 1952), waardoor pest-epidemieën en tuberculose geschiedenis leken. Steeds meer ziekteverwekkende bacteriën worden echter resistent tegen onze huidige medicijnen. Tegelijk is het ontdekken van nieuwe antibiotica moeilijk omdat het 'laaghangende fruit' reeds door de industrie is geoogst. Er is voorspeld dat als we zo doorgaan er in 2050 wereldwijd meer doden vallen door antibioticaresistentie dan door kanker.

Bijna alle antibiotica komen uit micro-organismen, en DNA sequencing technologie liet zien dat die meer genetisch potentieel voor antibiotica hebben dan gedacht. Deze 'slapende antibiotica' worden echter niet in het laboratorium geproduceerd omdat we niet weten hoe we ze 'aan' moeten zetten. Door het begrijpen van de ecologie van de bacteriën kunnen we deze signalen ontrafelen. Begrip van de biologie is daarmee de sleutel om deze moleculaire goudmijn te openen en miljoenen bacteriën en schimmels opnieuw te screenen voor de broodnodige nieuwe medicijnen.

Foto: Een kolonie van een Streptomyces bacterie met druppels antibiotica (blauw) op het oppervlak. De diameter van de kolonie is 1 cm

VERGROTEN, VERSNELLEN, VERBREDEDEN

Het is van groot belang dat de noodzakelijke biologische kennis op korte termijn **vergroot** wordt; veel van de genoemde uitdagingen zijn immers zeer acuut. Als we voor 2050, dus de komende dertig jaar, er niet in slagen om de mondiale klimaatverandering en het verlies aan biodiversiteit een halt toe te roepen zijn de gevolgen desastreus: honger, watertekorten, enorme bevolkingsmigratie, conflicten en een economische meltdown. We stevenen af op een mondiale crisis van een ongekende omvang. De pandemie van het SARS-Cov-2 virus heeft ons met de neus op de feiten gedrukt dat snel handelen bij infectieziekten veel levens kan redden, maar ook dat er biologische processen kunnen starten die geheel onvoorspelbaar verlopen en waar de mens niet zo snel een antwoord op heeft. Ons voorbereiden op scenario's die op niet erg lange termijn heel realistisch kunnen worden moet de allerhoogste prioriteit krijgen, en dit kan als we fundamenteel biologisch onderzoek van hoge kwaliteit **versnellen**,

FIGUUR 11: HET VERSNELLEN VAN DE MAATSCHAPPELIJKE IMPACT VAN DE BIOLOGIE

Het dynamische systeem waarin biologisch onderzoek kennis en oplossingen biedt om de huidige maatschappelijke uitdagingen aan te pakken, gevoed door forse investeringen in R&D. Het schema is bidirectioneel doordat biologisch onderzoek ook geïnspireerd wordt door maatschappelijke vragen. Zo is er sprake van 'return on investment'.



waarvoor toegang tot hoogwaardige technologie en data-analyse onontbeerlijk is. Nieuwsgierigheid gedreven onderzoek naar biologische basismechanismen en principes is hiervoor onmisbaar. Immers, de geschiedenis heeft duidelijk aangetoond dat veel van het toepassingsgerichte onderzoek slechts succesvol kon zijn doordat het voortbouwde op de, soms onverwachte, resultaten van fundamenteel onderzoek. Dit vraagt ook een modernisering van het onderwijs om de noodzakelijke experts op te leiden. Dankzij een aantal belangrijke technologische doorbraken zoals *gene editing*, -omicsbenaderingen (zoals *proteomics* en *metabolomics*), *single cell genomics*-technologieën, geavanceerde data-analyse, kunstmatige intelligentie en geoptimaliseerde *imaging*-technieken), is een enorme ontsluiting van biologische kennis nu mogelijk. De noodzakelijke **versnelling** van het biologisch onderzoek is nu ook daadwerkelijk haalbaar.

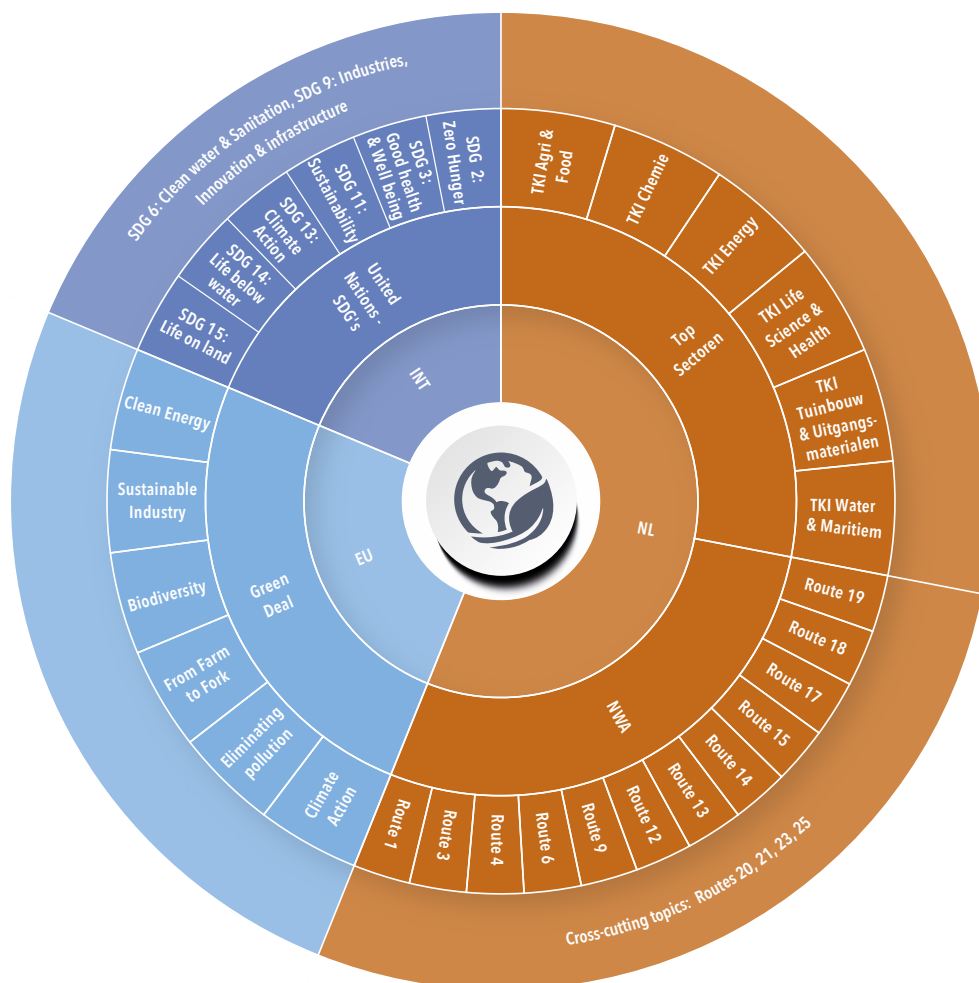
AMBITIE EN MISSIES

De biologie in Nederland heeft de ambitie om een substantiële bijdrage te leveren aan de *Sustainable Development Goals* (SDG's) van de Verenigde Naties; aan de doelen van de Europese *Green Deal*; en aan het missie-gedreven Nederlandse beleid en de routes aangegeven in de Nationale Wetenschapsagenda (NWA) (figuur12). Meer concreet wil de Nederlandse biologie de volgende missies helpen realiseren:

1. Langer leven in gezondheid mogelijk maken, infectieziekten beheersbaar maken, en welvaarts-, ouderdoms- en hersenziekten transformeren in chronische aandoeningen (NWA-routes 6, 12, 13, 14, 17, 18, 19 en 25; SDG 3).
2. Het versnellen van de ontwikkeling van gezond en veilig voedsel in een circulair landbouwsysteem en in een duurzame visserijsector (NWA-routes 3, 4, 12 en 23; SDG's 2, 3, 9, 12 en 14; Greendeal Farm to Fork).
3. De ontwikkeling en identificatie van robuuste voedselgewassen die resistent zijn tegen ziekten, plagen en klimaatverandering (NWA-routes 3, 4, 13, 15, 20 en 25; SDG's 2, 12, 13, 14 en 15).
4. De ontwikkeling van een betere leefomgeving met meer aandacht voor een schone bodem en atmosfeer en voor waterkwaliteit (NWA-routes 1, 3, 9, 13 en 21; SDG's 3, 6, 9, 11, 14 en 15; Greendeal Climate action, Industrial Strategy for a clean and circular economy, en Towards a zero-pollution ambition for a toxic free environment).
5. Maximalisatie van biodiversiteit en het herstellen en ontwikkelen van ecosystemen (NWA-routes 1, 9 en 15; SDG's 6, 14 en 15; Greendeal Preserving and protecting biodiversity).

Investing in deze missies zal helpen bij het oplossen van maatschappelijke uitdagingen, zal de Nederlandse economie op een duurzame wijze stimuleren, en zal een brede bijdrage leveren aan onze welvaart en ons welzijn. Om deze missies te realiseren vraagt de universitaire biologie in Nederland om meer wetenschappers in vaste dienst, meer geavanceerde technologie in de vorm van instrumentatie en krachtige data-analyse, en gemoderniseerde curricula aan de universiteiten met meer aandacht voor data-analyse, bioinformatica, kunstmatige intelligentie en veld- en soortenkennis.

FIGUUR 12: DE BIJDRAGE VAN BIOLOGIE AAN VERSCHILLENDE BELEIDSTHEMA'S OP NATIONAAL (NL), EUROPEES (EU) EN INTERNATIONAAL (INT) NIVEAU.



NWA: Nationale Wetenschapsagenda

Route 1: Blauwe Route water als weg naar innovatie en duurzame groei,

Route 3: Circulaire economie en grondstoffen en duurzame circulaire impact,

Route 4: Duurzame productie van gezond en veilig voedsel,

Route 6: Gezondheidszorgonderzoek, preventie en behandeling,

Route 9: Kwaliteit van de omgeving,

Route 12: Materialen - Made in Holland,

Route 13: Meten en detecteren: altijd, alles en overal,

Route 14: NeuroLab NL: dé werkplaats voor hersen-, cognitie- en gedragsonderzoek,

Route 15: Oorsprong van het leven - op aarde en in het heelal,

Route 17: Personalised medicine: uitgaan van het individu,

Route 18: De quantum / nano-revolutie,

Route 19: Regeneratieve geneeskunde: gamechanger op weg naar brede toepassing,

Route 20: Smart industry,

Route 21: Smart, liveable cities,

Route 23: Sustainable Development Goals voor inclusieve mondiale ontwikkeling,

Route 25: Waardecreatie door verantwoorde toegang tot en gebruik van big data.

Topsectoren: Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI)

SDG's: Sustainable Development Goals

Buitenring: thema's met relatie tot de biologie, maar aan de diffuse randen van de discipline



HOE GAAN WE (BETER) OM MET INFECTIEZIEKTEN?

De COVID-19 pandemie drukt ons met de neus op de feiten: voorbereiden op nieuwe ziekten is een must. Globalisering, reisgedrag, druk op ecosystemen, en klimaatverandering hebben alle effect op opkomst en verspreiding van infectieziekten. Wachten tot een epidemie begint is spelen met vuur, zoals is gebleken: ingrijpende en dure maatregelen moeten worden genomen op basis van beperkte kennis en in een race tegen de klok. Kennis van pathogenen, hun werkingsmechanismen, welke effecten ze hebben op de gastheer en het immuunsysteem zijn onontbeerlijk als basis voor toekomstige bestrijding, behandeling en preventie. De top 10 pandemische dreigingen op de lijst van de World Health Organization zijn zoönosen, waarbij de kans op overdracht toeneemt door veranderende ecosystemen, en de effecten daarvan op dieren en vectoren zoals muggen of teken. Biologen zoeken naar mogelijkheden voor vroege opsporing en preventie. De basis voor de huidige kennis van coronavirussen is gelegd in het verleden door investeringen in fundamentele kennis, maar langetermijninvesteringen bleven uit. Met de kennis van nu weten we beter.

BENODIGDE BIOLOGISCHE KENNIS

Door biologische processen en mechanismen te vertalen naar en te bestuderen in intacte organismen die functioneren onder natuurlijke omstandigheden kunnen zogenaamde emergente eigenschappen worden ontdekt. Dit zijn eigenschappen van een groter geheel, die ontstaan door een samenspel van de afzonderlijke bouwstenen – bijvoorbeeld individuele moleculen die samen leiden tot een levende cel en van wezenlijk belang zijn voor een volledig begrip van het leven. Het is als gevolg van de revolutionaire technologie- en kennisontwikkeling van de afgelopen decennia nu beter dan ooit mogelijk om deze eigenschappen te vinden en bestuderen. Deze zogeheten systeembenadering biedt ons de mogelijkheid om de grote vragen van de biologie te beantwoorden: Hoe kunnen we de ontregeling van ons immuunsysteem en van onze celdeling voorkomen en tegengaan? Hoe kunnen we ouderdom en de hiermee geassocieerde ziekten beter beheersen? Hoe kan begrip van het samenspel tussen organismen (zoals het microbioom in relatie tot dier en plant) ons helpen om de ontwikkeling van dier en plant beter te begrijpen en in te grijpen als deze ontregeld dreigt te raken? Hoe kunnen we gewassen ontwikkelen die in staat zijn te groeien onder klimaatgerelateerde stress? Welke processen sturen biodiversiteit? Hoe verschillen organismen op moleculair niveau? Hoe is dit verschil evolutionair ontstaan en welk effect heeft dit op de werking en overlevingskansen van organismen?

Op basis van het Nederlandse *trackrecord* in de biologie (zie hoofdstuk ‘Organisatie en impact van de biologie’) hebben we vier focusgebieden gedefinieerd waarin investeringen noodzakelijk zijn om de in het hoofdstuk ‘Biologie als basis van een gezonde wereld’ genoemde missies te realiseren: Bouwstenen van het leven, Aanpassing en evolutie, Van ecosysteemprocessen naar biodiversiteit, en Vernieuwende technologie. Dit vierde gebied omvat geavanceerde en hoogwaardige instrumentatie en krachtige data-analyse daar dit voorwaarden zijn voor het genereren van nieuwe kennis. Voor dit hoofdstuk heeft de taskforce dankbaar gebruik gemaakt van de strategische focusnotities die door de NWO-werkgemeenschappen Levenswetenschappen zijn geschreven¹².

BOUWSTENEN VAN HET LEVEN

De cel is de basale eenheid van het leven, waarin belangrijke processen als stofwisseling (metabolisme), celdeling, ontwikkeling en weefseldifferentiatie zich afspelen. Onderzoek aan cellen en weefsels levert fundamentele inzichten op in het ontstaan van leven en de evolutie van de bouwstenen van ons leven. Dankzij de razendsnelle ontwikkelingen in *high-throughput DNA-sequencing* is ons inzicht in erfelijke eigenschappen van organismen sterk vergroot.

¹² www.nwo.nl/wg-leven

De cel- en ontwikkelingsbiologie levert fundamentele kennis van de bouwstenen van het leven en is dus van groot belang voor onze gezondheidszorg. Hierbij moeten we denken aan de moleculaire basis van kanker en veroudering, bestrijding van infectieziekten, de biologie van gedrag en onze hersenen, en de aantasting van gewassen door bacteriën, schimmels en plagen en extreme weerscondities. Om onze kennis en ons begrip van cellen en weefsels nog verder te vergroten, benoemen wij een tweetal aandachtsgebieden:

INTERACTIES TUSSEN EN BINNEN CELLEN

Een beter begrip van de communicatieprocessen binnen en tussen cellen is nodig om bijvoorbeeld te begrijpen hoe ons geheugen werkt, maar ook om meer vat te krijgen op ziekten. Daarnaast is begrip van de communicatie tussen microben en hun gastheer (plant, dier of mens) belangrijk. De studie van het microbiom (een gemeenschap van bacteriën, gisten en/of schimmels die op of in andere organismen leven) is een veld dat zich enorm ontwikkelt. Het begrijpen van de factoren die de stabiliteit van het microbiom reguleren en de impact ervan op onze gezondheid en de ontwikkeling van duurzame landbouw zijn belangrijke aandachtsgebieden. Plantenwetenschappers zullen profiteren van technologische ontwikkelingen die helpen om nieuwe gewassen te ontwikkelen, zoals gene editing dat het mogelijk maakt om bestaande rassen te verbeteren. Nieuwe inspanningen zijn ook nodig om CRISPR-Cas en andere genetische gereedschappen te blijven ontwikkelen, evenals grootschalige en single cell genomics, proteomics en metabolomics om mechanismen te ontrafelen die cellen en weefsels reguleren in microben, planten, dieren en de mens.

BOUWEN MET BIOLOGIE

De biologie ontwikkelt zich tot een 'ontwerp' discipline, doordat we steeds meer mogelijkheden hebben om levende systemen blijvend te veranderen. Het toenemende begrip van cellulaire systemen, in combinatie met concepten en inzichten uit de systeembioologie en de verbluffende mogelijkheden van de nieuwe genetische gereedschappen, maakt het mogelijk om biologische systemen met nieuwe functionaliteiten te creëren. De synthetische biologie is een vakgebied dat kijkt naar het ontwerp van de moleculaire regelmechanismen in de cel en heeft in de afgelopen jaren veel verschillende vakgebieden zoals biotechnologie, celbiologie en informatietechnologie bij elkaar gebracht. Dit onderzoek helpt ons om diep begrip van het ontstaan van leven te krijgen en om synthetische levensvormen te genereren waarmee potentieel maatschappelijke bedreigingen op een innovatieve manier kunnen worden aangepakt. De toegenomen mogelijkheden voor genetische modificatie voortgekomen uit fundamenteel onderzoek, zoals CRISPR-Cas, hebben in recente jaren gezorgd voor een grote versnelling in innovaties, met als aansprekende voorbeelden het herprogrammeren van bacteriën of gistcellen voor de productie van nieuwe antibiotica, het modificeren van immuuncellen voor immunotherapie, en de ontwikkeling van robuuste, stresstolerante gewassen.

AANPASSING EN EVOLUTIE

Fundamenteel begrip van ontwikkeling, aanpassing en evolutie van het leven is cruciaal voor het oplossen van belangrijke maatschappelijke vraagstukken, variërend van de reductie in biodiversiteit en verschraving van de leefomgeving tot het begrijpen van de invloed van de omgeving op onze fysieke en mentale gezondheid. Het leven kenmerkt zich door een enorm vermogen tot aanpassing. De ontwikkeling van een organisme ligt vast in de door de evolutie tot stand gekomen genetische informatie (genotype), maar komt tot wasdom

in wisselwerking met de omgeving (fenotype). Hoe de informatie in het genoom vertaald wordt tot een complex individu, met emergente eigenschappen zoals taakverdeling tussen weefsels en organen, gedrag, geheugen en bewustzijn, is een fundamentele vraag die we alleen door middel van biologisch onderzoek kunnen beantwoorden.

De grote invloed van de mens op het landgebruik en atmosfeer heeft tot snelle veranderingen geleid in de leefomgeving van vrijwel alle organismen op onze planeet; denk aan vervuiling, klimaatverandering, en grootschalige verstedelijking. Stedelijke gebieden zijn in oppervlakte groter dan veel natuurlijke ecosystemen. Evolutie en plasticiteit zijn essentieel voor aanpassing van soorten aan deze antropogene veranderingen. Anderzijds is het ook duidelijk geworden dat deze aanpassingen vaak niet snel genoeg gaan voor soorten om te overleven. Ook voor de ontwikkeling van voedselgewassen die resistent zijn tegen klimaatveranderingen en ziekteverwekkers is een goed begrip van hun ontwikkelingsbiologie en van de interactieve processen tussen genotype en omgeving noodzakelijk. Om onze kennis en ons begrip van aanpassing en evolutie nog verder te vergroten, zijn de volgende aandachtsgebieden van belang:

VAN GENOOM TOT INDIVIDUELE EIGENSCHAPPEN

Gemiddeld vinden we 5 miljoen verschillen in DNA-volgorde tussen het genoom van verschillende mensen. De vraag is hoe deze variatie in het genoom verschillen in individuele eigenschappen reguleert, zoals uiterlijk, gedrag, voortplanting of levensduur. Verschillen in eigenschappen tussen individuen zijn nooit het gevolg van genen alleen, maar een gevolg van zowel de interacties tussen genen onderling, als van de interactie tussen genen en omgevingsfactoren. Daarnaast is de laatste jaren duidelijk geworden dat omgevingsinvloeden zelfs tot in de volgende generatie reiken (epigenetica). Zo is bijvoorbeeld de kwaliteit en kwantiteit van de voeding van een aanstaande moeder medebepalend voor de gezondheid van de nieuwgeborene. Hoe genen met elkaar en met de omgeving interacteren is een van de meest fundamentele vragen binnen de biologie en kennis hierover zal sterk bijdragen aan het oplossen van diverse maatschappelijke uitdagingen.

AANPASSING AAN EEN SNEL VERANDERENDE WERELD

Kennis van ontwikkeling en evolutie is nodig om te kunnen voorspellen in hoeverre micro-organismen, planten en dieren zich kunnen aanpassen aan een veranderende omgeving. De mens is verantwoordelijk voor grote en snelle veranderingen op onze planeet. In het zogenaamde Antropoceen is de snelheid van uitsterven van soorten zeer hoog. Eén van de meest prangende vragen is daarom of organismen zich snel genoeg kunnen aanpassen aan deze snelle veranderingen. Kennis hiervan helpt ons te voorspellen of we in een dynamische omgeving de biodiversiteit kunnen handhaven.

INTERACTIES TUSSEN MACRO- EN MICRO-ORGANISMEN

Planten en dieren zijn in hun functioneren afhankelijk van micro-organismen waarmee zij nauw samenleven. De mens bevat bijvoorbeeld meer bacteriën dan lichaamscellen. Gemeenschappen van microben spelen een sleutelrol bij de preventie van ziekten bij mens, dier en plant, waaronder Alzheimer, infectieziekten, leveraandoeningen en schimmelinfecties van gewassen, bij de effectiviteit van medicijnen, bij de opname van voedingsstoffen door planten en bij de uitstoot van broeikasgassen door vee. Daarnaast interacteren micro-organismen met elkaar waardoor afvalstromen efficiënt in de natuur worden gerecycled.

VAN ECOSYSTEEMPROCESSEN NAAR BIODIVERSITEIT

De onvoorstelbare rijkdom aan soorten op onze planeet is ontstaan gedurende miljoenen jaren van (co-)evolutie, waarin organismen in onderlinge afhankelijkheid van elkaar en van hun omgeving zijn gevormd. Belangrijke maatschappelijke uitdagingen, zoals de enorme achteruitgang van de biodiversiteit, de achteruitgang van onze leefomgeving (bodem, water, lucht), de gevolgen van klimaatverandering en overbevissing kunnen alleen aangepakt worden door meer kennis te vergaren over het functioneren van ecosystemen. Een systeembenadering is voor dergelijke uitdagingen onontbeerlijk omdat enorm veel factoren betrokken zijn bij het functioneren van ecosystemen. Ecosystemen leveren diensten die van vitaal belang zijn voor onze maatschappij: schoon water, vitale bodems en bestuiving van onze gewassen zijn slechts een paar voorbeelden. Pas als we de ecosystemen begrijpen kunnen we gerichte maatregelen nemen om deze te beschermen.

Kennis van biologische processen in zoetwatersystemen is essentieel om de risico's van klimaatverandering voor waterkwaliteit te begrijpen en te voorspellen. Ook voor het beschermen van individuele soorten is kennis van hun onderlinge afhankelijkheid en van hun voedselnetwerken belangrijk. Immers, veel vogelsoorten kunnen niet overleven zonder voldoende insecten; planten hebben een gezonde bodem nodig met een goede kringloop van nutriënten; waterplanten vormen essentiële leefomgevingen voor waterinsecten; en vissen en insecten zijn noodzakelijk voor de bestuiving van planten.

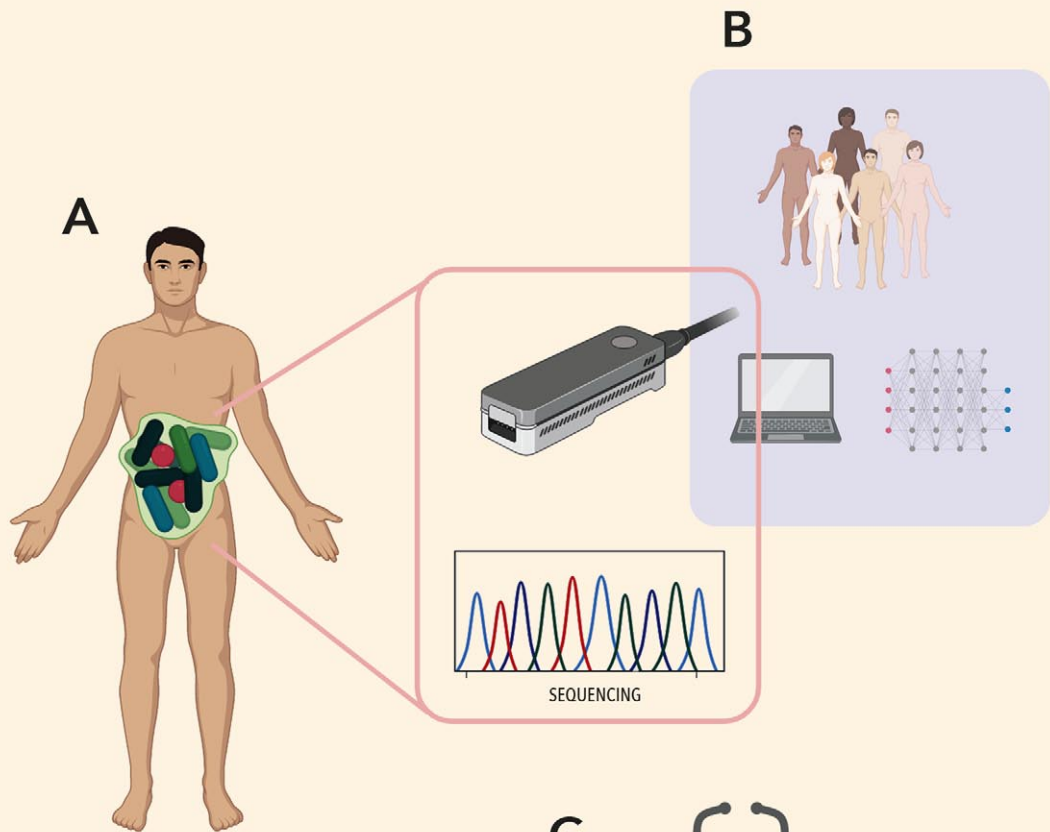
Verder is de enorme biodiversiteit op aarde een essentiële bron voor onze toekomstige medicijnen. Bacteriën en schimmels vormen de basis van vrijwel alle antibiotica, maar ook van talloze antikanker- en antivirale middelen en medicijnen die we gebruiken om ons immuunsysteem te versterken, en van specifieke enzymen die het gebruik van vervuilende chemische processen niet langer nodig maken. Ook planten vormen een rijke, nauwelijks ontgonnen bron van zeer veel medicinale verbindingen. Binnen de ecologie zien we als uitdagende aandachtsgebieden voor de toekomst:

VOORSPELLEN VAN DE VEERKRACHT VAN ECOSYSTEMEN

Hoe kunnen we voldoende veerkracht en herstelvermogen in ecosystemen behouden? Hoe hangen biodiversiteit, interacties tussen soorten en individuen, veerkracht, en opbrengst van ecosystemen met elkaar samen? Het is essentieel om niet alleen reeds ingezette systeemveranderingen te begrijpen, maar ook consequenties van ingrepen vooraf te kunnen inschatten. Denk op nationaal niveau aan de komst van windparken in de Noordzee, peilverhoging in het IJsselmeer, de aanleg van de Markerwadden in het Markermeer, of het gebruik van bestrijdingsmiddelen. En op wereldschaal moeten we inzicht verkrijgen in de gevolgen van ingrepen als *geo-engineering* tegen klimaatverandering.

OVERGANG NAAR DUURZAME LANDSCHAPPEN

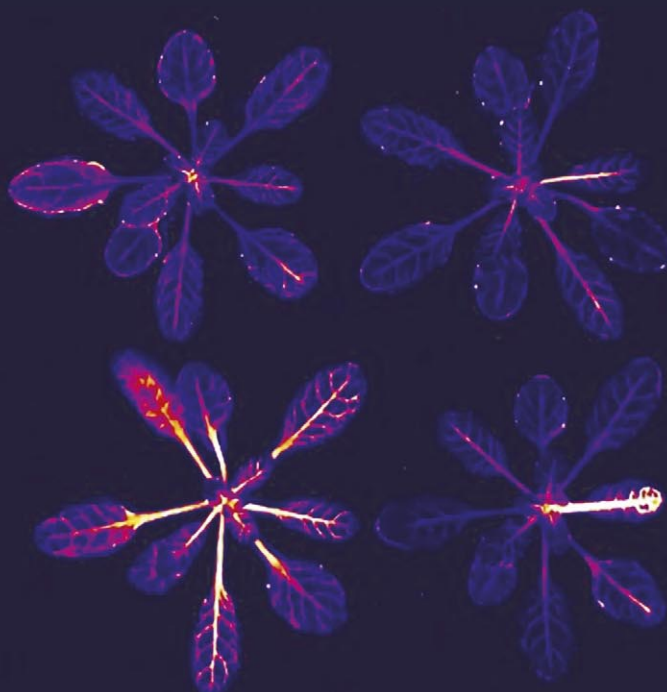
Een van de meest prangende vraagstukken is hoe we 10 miljard mensen op deze planeet duurzaam kunnen voeden en toegang kunnen geven tot drinkwater van goede kwaliteit, en tegelijkertijd ons natuurlijk kapitaal kunnen beschermen. Kennis van ecosystemeprocessen en biodiversiteit is cruciaal om de economische, sociale en gezondheidsvoordelen van de natuur op een verantwoorde en goede wijze te benutten. Er is een grote vraag vanuit de maatschappij naar op de natuur gebaseerde oplossingen, die verschillende functies van landschappen zoals agrarisch, residentieel, recreatief, industrieel en (semi) natuurgebied



PREVENTIE, DIAGNOSE EN THERAPIE OP DE VOET GEVOLGD!

De enorme versnelling van genoombrede data-acquisitie maakt het mogelijk snel een genoom 'vingerafdruk' van ieder van ons te maken. Dat betekent dat we onder andere goed kunnen zien hoe ons metabolisme op verschillende voedingspatronen reageert. Deze informatie is ook te relateren aan het individuele microbioom (alle genen van bacteriën in en op ons). Er is al aangetoond dat een gepersonaliseerd advies over voeding gebaseerd op de individuele genenpool van mensen en hun microbioom echt HET verschil maakt bij gericht effectief ingrijpen in voorkomen en behandelen van bijvoorbeeld diabetes type 2. Verschillende follow-up studies lopen nu, onder andere in Nederland, om een brede basis te leggen voor op moleculair-mechanistische kennis gebaseerde voedingsadviezen waarmee op het individu gerichte preventie van ziekte bereikt wordt. Een recente publicatie laat zien hoe goede, genoombrede, analyses mogelijk zijn met een reguliere mobiele telefoon. Daarmee kunnen we straks 'on the spot', genoomanalyses doen en bijvoorbeeld de verspreiding van infectieziekten maar ook de effectiviteit van preventie en therapie in de gezondheidszorg 'op de voet volgen'.

Afbeelding: de individuele microbioomcompositie (A) wordt geïntegreerd in databases met informatie over de link tussen microbioom en behandelmethodes verkregen uit grote populatie- of interventiecohorten (B). Op basis hiervan wordt een persoonlijk behandelplan opgesteld (C).



DE ARCHITECTUUR VAN PLANTEN

Bij het woord architectuur denken we aan gebouwen, zelden aan biologie. Maar ieder organisme heeft ook een eigen architectuur en deze is van levensbelang voor de groei en ontwikkeling. Waar de architectuur van dieren vastligt (mensen hebben nooit meer dan twee benen en twee armen), is bij planten het tegenovergestelde waar: er is een spectaculaire flexibiliteit in het aantal 'ledematen'. Plantenwortels ontwikkelen zich daar waar het meeste water of voeding te halen is. Planten richten hun bovengrondse architectuur zo in dat de bladeren optimaal licht onderscheppen en schaduw vermijden.

Biologen zijn inmiddels in staat om zeer nauwkeurig de architectuur van planten te optimaliseren. Zo kan de wortelarchitectuur worden gestuurd voor groei bij te veel/te weinig water, of de bovengrondse architectuur zo worden gestuurd dat gewassen bij nog hogere plantdichtheden optimale opbrengst kunnen leveren. Zo dragen biologen bij aan een toekomstbestendige voedselproductie.

Foto: Precisie-sturing van architectuur, kleurintensiteit representeert weefsel-specifieke regulatie van een plantenhormoon dat de ontwikkeling stuurt.

effectief met elkaar combineren. Met name in een dichtbevolkt land als Nederland is dit van groot belang.

DOOR DE MENS GECREËERDE ECOSYSTEMEN

Ons land is te klein voor uitgestrekte onaangetaste ecosystemen. Vandaar dat voortdurende studie naar ecosystemen die door de mens zijn beïnvloed of zelfs zijn gecreëerd voor ons land cruciaal is. Belangrijk in dit kader zijn de nieuwe inzichten op het gebied van natuur-inclusieve landbouw: een transitie naar nieuwe land- en tuinbouw productiesystemen gebaseerd op agro-ecologische principes en *smart farming* zijn noodzakelijk. Dit kunnen we alleen maar realiseren als we op fundamenteel niveau kennis hebben van biologische principes gekoppeld aan veerkracht en weerbaarheid. Ook van belang is de snelle opkomst van het vakgebied ecologie van stedelijke gebieden, waarbij grote rollen zijn weggelegd voor *citizen science* en het bouwen met natuur.

VERNIEUWENDE TECHNOLOGIE: DATA-ANALYSE EN GEAVANCEERDE METHODEN

Nieuwe experimentele technieken zoals *high-throughput DNA-sequencing* en eiwit- en metaboliet analyse leiden tot enorme hoeveelheden nieuwe data. Het sequencen van genomen van veel organismen leidt tot inzicht in natuurlijke mutaties en in een beter inzicht in de betekenis van *gene editing* (CRISPR-Cas). Technologieontwikkeling veroorzaakt een nieuwe manier van werken waarin met behulp van grootschalige, professioneel beheerde *databases*, met specifieke algoritmen nieuwe inzichten verkregen worden. Dit is het veld van data-analyse en integratie, systeem- en computationele biologie, bioinformatica en kunstmatige intelligentie dat grote vooruitgang kent. In principe geldt hier *the sky is the limit* wat betreft de hoeveelheid data, maar dan moeten we wel borgen dat de kwaliteit zeer hoog is en we de data op een efficiënte manier kunnen analyseren, integreren en benutten. Dit internationale veld heeft zich in de afgelopen jaren razendsnel ontwikkeld. Nederland moet zorgen dat het blijft. De biologie werkt daarom graag met overheid en aanpalende sectoren mee aan het Strategisch Actieplan voor Artificiële Intelligentie van de Rijksoverheid¹³. De nadruk is voor de biologie komen te liggen op grootschalige samenwerkingsverbanden waarbinnen enorme hoeveelheden data geproduceerd worden. Adequaate management van deze *big data* en het beschikbaar maken voor hergebruik door middel van *open science* zijn hierbij grote uitdagingen. Hiervoor belangrijke aandachtsgebieden voor de nabije toekomst zijn:

SINGLE-CELLTECHNOLOGIEËN

Tijdens het begin van deze eeuw werd een revolutionaire mijlpaal bereikt: de ontrafeling van de DNA-volgorde van het menselijk genoom. Momenteel willen we veel meer: we willen begrijpen welke genen belangrijk zijn voor het functioneren van een enkele cel. We willen bijvoorbeeld snappen hoe individuele cellen reageren op chemotherapie of hoe individuele wortelcellen van planten reageren op stress veroorzaakt door bepaalde klimaatomstandigheden, zoals droogte en verzilting van de bodem.

¹³ Strategisch Actieplan voor Artificiële Intelligentie, Ministerie van Economische Zaken en Klimaat oktober 2019

NIEUWE IMAGING-TECHNIEKEN

Microscopie heeft altijd een cruciale rol gespeeld in het ontrafelen van levende systemen, vanaf de beroemde observaties van Antoni van Leeuwenhoek tot en met het hedendaagse onderzoek. Elektronenmicroscopie maakt het tegenwoordig mogelijk atomaire structuren van cellulaire bouwstenen zichtbaar te maken, massaspectrometrie en omics-technieken brengen moleculaire signalen op cellulair niveau in kaart, en lichtmicroscopie brengt de dynamiek en ontwikkeling van levende systemen in beeld. Daarmee zijn de ontwikkelingen echter niet klaar. Zo maakt *lightsheet*-microscopie het sinds kort mogelijk om de volledige ontwikkeling van transparante organismen te filmen en te volgen hoe elke cel zich tijdens dat proces verplaatst en specialiseert. Eiwit-*engineering* biedt steeds meer mogelijkheden om allerlei subcellulaire processen, zoals celdeling en communicatie, met hoge resolutie zichtbaar te maken. Beeldvormende massaspectrometrie kan de moleculaire stofwisseling van een enkele cel in kaart brengen, terwijl super-resolutiemicroscopie het mogelijk maakt om afzonderlijke moleculen te onderscheiden. Ten slotte maakt optogenetica het mogelijk om met licht cognitieve processen zoals geheugen, beslissingen en selectieve aandacht niet alleen te bestuderen, maar ook te besturen.

KUNSTMATIGE INTELLIGENTIE

Nieuwe single-celtechnologieën leveren heel veel data op, waardoor de vertaalslag naar fundamentele mechanismen en principes steeds moeilijker wordt. Biologen hebben daarom hulp nodig. Informatietechnieken zoals *deep learning* en kunstmatige intelligentie worden steeds belangrijker in het ontsluiten, analyseren en begrijpen van de informatie die deze grote datasets bevatten. Zo helpen deze revolutionaire technologieën de vorm van eiwitten te voorspellen, die hun functie bepaalt en inzichten biedt in waarom bepaalde mutaties geen effect hebben op de functie van een eiwit en andere juist heel veel. Kunstmatige intelligentie maakt het ook mogelijk video-opnames binnen het gedragsonderzoek automatisch te analyseren, soorten in de natuur te herkennen, of structuren te herkennen en te classificeren in beeldmateriaal van biologische weefsels. Daarnaast is er een vruchtbare koppeling tussen kunstmatige intelligentie en hersenonderzoek.



DE DYNAMICA VAN STADSNATUUR

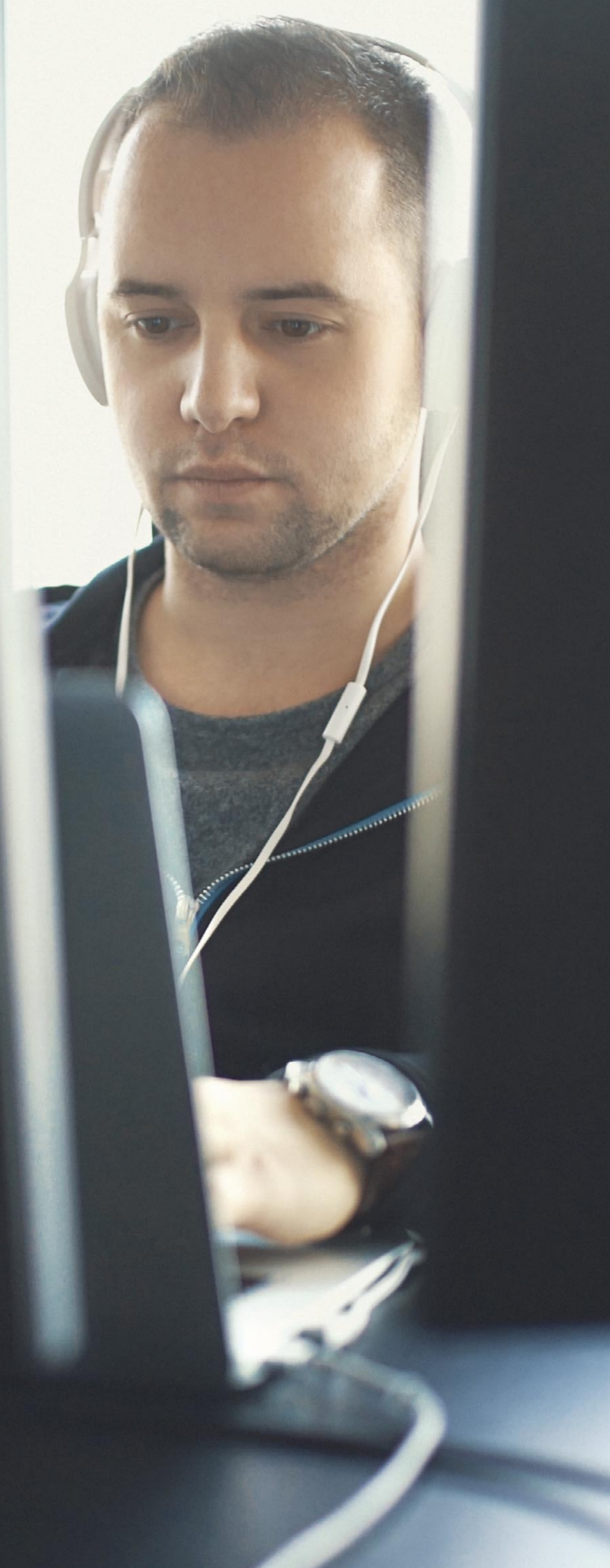
103

Een groot deel van de Nederlandse bevolking woont in een stedelijke omgeving. Stadsdieren en -planten zijn vaak door natuurbeschermers niet erg geliefde, uitheemse of verwilderde gedomesticeerde soorten. Ook zijn de leden van deze urbane ecosystemen vaak onzichtbaar: ze leiden een verborgen leven in regengoten, achtertuintjes en regenputten.

Maar stadsnatuur wordt steeds belangrijker: regelmatige blootstelling aan wilde dieren en planten verhoogt onze lichamelijke en geestelijke gezondheid en stadsnatuur is dus onmisbaar in het leefbaar houden van onze steden. Urbane biologen zijn steeds belangrijker voor het zichtbaar maken en ontsluiten van de waarde van deze stedelijke ecosystemen. Hoe passen wilde dieren en planten zich evolutionair aan de mens aan en hoe kunnen we van deze hoge evolutionaire snelheid gebruik maken bij het vormgeven van natuurinclusieve stadsplanning? Hoe houden we ecosysteemfuncties in stand tegen een achtergrond van soorten die voortdurend komen en gaan?

REKENEN AAN BIOCOMPLEXITEIT

Levende systemen zijn bijzonder complex. Elke cel produceert duizenden eiwitten die met elkaar reageren, en elke cel leeft in een complexe omgeving met andere cellen en moleculen. Levende materie bestaat dus uit een groot aantal componenten die via interacties het uiterlijk en het gedrag van cellen en organismen bepalen. Dit is biocomplexiteit. In een handomdraai bepalen biologen met nieuwe technieken het erfelijk materiaal van allerlei diersoorten en planten, van bacteriën of virussen, of van hele leefgemeenschappen van bacteriën in een darm. In een enkele cel kan worden bepaald welke genen aan staan en welke uit, en welke eiwitten er geproduceerd worden. De verwerking en interpretatie hiervan kan alleen nog maar met computer-algoritmes. Deze aanpak heet bioinformatica. Door het erfelijk materiaal van verschillende soorten te vergelijken bestuderen bioinformatici evolutie. Op deze manier is een heel nieuw bacteriënrijk ontdekt (de Archaea). Om te begrijpen hoe de complexe netwerken functioneren, maken theoretisch biologen wiskundige modellen die met computers bestudeerd worden. Zo wordt nu ook de Covid-19 pandemie gemodelleerd.



ORGANISATIE EN IMPACT VAN DE BIOLOGIE

BIOLOGIE ALS KERNDISCIPLINE

Biologie heeft een centrale positie in het Nederlandse bètalandschap. Het is een discipline met diffuse randen, maar met een duidelijke en onmisbare kern. Het is niet voor niets dat veel van de in de afgelopen decennia ontstane nieuwe interdisciplinaire vakgebieden beginnen met het voorvoegsel bio: denk aan biofysica, biochemie, biomedische wetenschappen en bionanoscience. Biologie is binnen de samenwerking met andere disciplines onmisbaar om inzicht te verschaffen in levende componenten zoals cellen, membranen en DNA-moleculen en om overzicht te genereren van verschillende lagen van interacties binnen complexe systemen. Zowel het sectorbeeld chemie als dat van de natuurkunde benoemen expliciet aan biologie gekoppelde focusgebieden voor het toekomstige onderzoek binnen deze disciplines¹⁴. Een investering in de fundamentele van de biologie zal daarom fungeren als hefboom voor de reeds in die sectoren geïnvesteerde sectorplangelden. Er bestaan ook sterke dwarsverbanden met geneeskunde en farmacie (medische biologie, genetica, neurobiologie, gezondheid, regeneratieve geneeskunde, medicijnontwikkeling), diergeneeskunde (dierenwelzijn, dierfysiologie), aard- en milieuwetenschappen (ecosystemen, oceanen, klimaat, urbane (leef)omgeving), sociale wetenschappen (gedrag, psychobiologie) en landbouwwetenschappen (gewasbescherming, gewasfysiologie, veredeling). Daarnaast levert de biologie een kernbijdrage aan veel nieuwe interdisciplinaire opleidingen (zie bijlage 10).

LANDELIJKE ORGANISATIE

De biologie in Nederland is een steeds beter georganiseerde discipline. Zo zijn er coherente vakverenigingen, onderzoeksscholen en landelijke onderzoeksnetwerken die onderzoekers binnen specifieke subdisciplines verenigen. Meer overkoepelend is de biologie in Nederland georganiseerd door middel van de KNAW-sectie Biologie, de reguliere overleggen tussen de directeurs van de biologie-gerelateerde onderzoeksinstituten van KNAW en NWO en Naturalis, het Nederlands Instituut voor Biologie (NIBI) en de recent ingestelde werkgemeenschappen van de NWO Tafel Levenswetenschappen. Veel van deze organisaties hebben een zeer actieve rol gespeeld bij de totstandkoming van dit sectorbeeld. Het landelijk overleg bètadecanen initieerde de totstandkoming van dit sectorbeeld door een opdracht te verlenen aan de Taskforce sectorbeeld biologie. Dankzij gecoördineerde actie is de biologie in Nederland tot een eensgezinde visie gekomen, die in dit rapport gepresenteerd wordt. De gevoerde discussies leidden tot nieuwe initiatieven voor samenwerking zoals tussen NIOZ, NIOO, Westerdijk Instituut en Naturalis en uitwisseling van visies en praktische aanpak tussen de betrokken instellingen. Zo leidt dit sectorbeeldproces ook in deze sector tot 'nieuw elan'¹⁵. Gezien de positieve energie tijdens deze interacties heeft het proces om te komen tot dit sectorbeeld de saamhorigheid van de Nederlandse biologiegemeenschap verder vergroot.

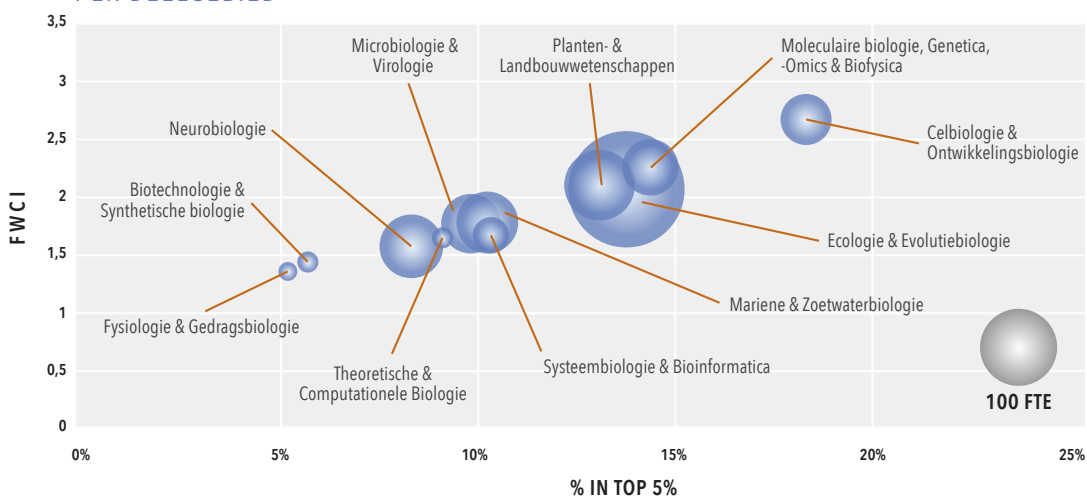
¹⁴ Een nieuw fundament: beeld van de bètasector, januari 2019.

¹⁵ Wim van Saarloos (2020). Meer wetenschap in Nederland: hoe we onze samenwerking, diversiteit en kracht verder kunnen versterken

HET NATIONALE PROFIEL

Een eerste stap naar een nationaal profiel is het beschouwen van de zwaartepunten op nationaal niveau. Hiertoe zijn twee kwaliteitsmaten van het biologisch onderzoek in Nederland in een grafiek tegen elkaar uitgezet. Dit is de citatieparameter *Field-Weighted Citation Impact* (bijlage 11) en het percentage artikelen van een subdiscipline dat hoort bij de top 5 procent best geciteerde artikelen in dat veld. Elke subdiscipline is in deze grafiek weergegeven als een cirkel waarvan het oppervlak correspondeert met het aantal FTE's in vaste dienst die werkzaam zijn in deze subdiscipline in Nederland (figuur 13, voor methodiek zie bijlage 11). Deze grafiek laat in één oogopslag zien dat de kwaliteit van de biologische subdisciplines in Nederland uitstekend is.

FIGUUR 13: OVERZICHT VAN HET AANTAL FTE EN KWALITEITSMATEN PER DEELGEBIED



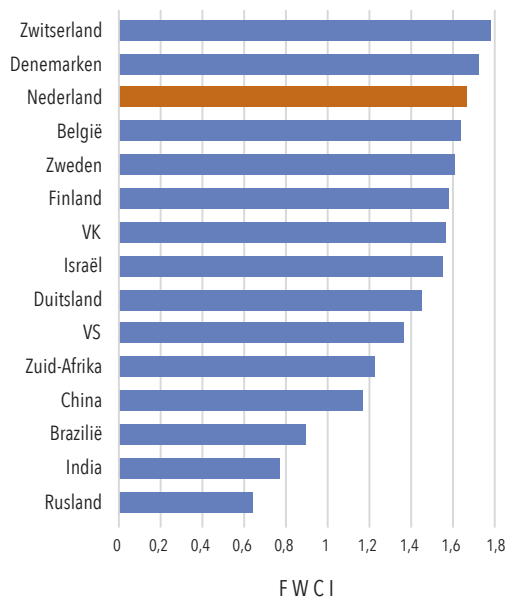
In de citatie-analyse (voor methodiek zie bijlage 11) is per deelgebied van de biologie de *field-weighted citation impact* (fwci) en het percentage van de publicaties per deelgebied dat in de wereldwijde top 5 procent van meest geciteerde publicaties terechtkomt bepaald. Waardes van de fwci boven 1 en waardes van het percentage boven 5% zijn bovengemiddeld. Alle deelgebieden scoren daarmee ruim bovengemiddeld voor beide kwaliteitsmaten. Tevens geeft de grootte van iedere bol het aantal FTE wetenschappelijk personeel in vast dienstverband weer per deelgebied.

De Nederlandse biologie lijkt het best te vergelijken met een hoogvlakte, waarin veel vakgebieden voortreffelijk presteren. Opvallend zijn wel de verschillen in grootte (FTE's) van de diverse subdisciplines, waaruit blijkt dat Nederlandse instellingen veel investeren in ecologie- en evolutie-onderzoek. Een goede tweede categorie zijn de investeringen in microbiologie en virologie, mariene en zoetwaterbiologie, plantenbiologie en landbouwwetenschappen, celbiologie en ontwikkelingsbiologie, neurobiologie en moleculaire biologie. Er wordt momenteel binnen de 8 universiteiten en de 6 instituten relatief weinig geïnvesteerd in fysiologie en gedragsbiologie, biotechnologie en synthetische biologie, theoretische biologie en computatieve biologie, en systeembioologie en bioinformatica. Dit beperkte profiel in met name de kwantitatieve biologie is opmerkelijk gezien het toenemend belang van deze subdisciplines om, in nauwe samenwerking met de meer traditionele subdisciplines, kennis aan te leveren die cruciaal is om grote maatschappelijke uitdagingen op te lossen.

KWALITEIT NEDERLANDSE BIOLOGIE

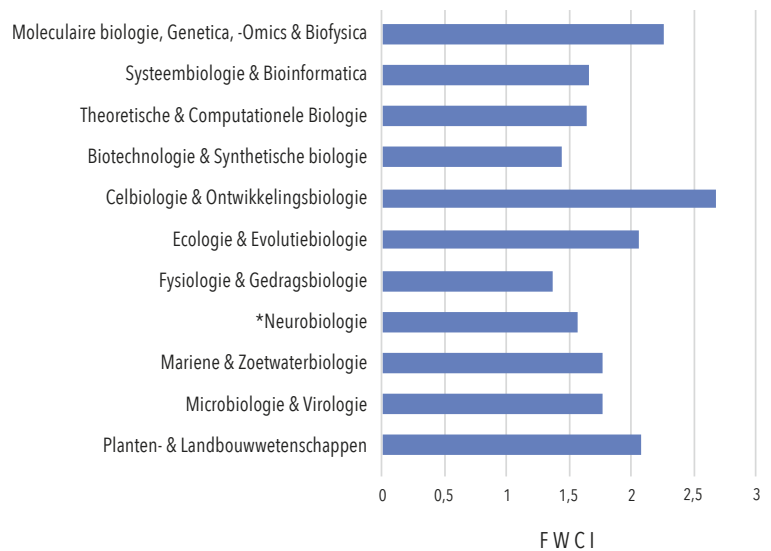
Het Nederlandse universitaire biologie-onderzoek staat internationaal aan de top. Uit een nieuwe, voor dit rapport uitgevoerde, citatie-analyse (bijlage 11) blijkt dat in Nederland werkzame biologen gemiddeld 66 procent beter geciteerd worden dan het wereldgemiddelde. Nederland behoort daarmee tot de toptanden in biologisch onderzoek (figuur 14). Ook alle Nederlandse biologische subdisciplines afzonderlijk worden fors beter geciteerd dan het wereldgemiddelde (figuur 15). Deze excellente status is in overeenstemming met het oordeel van internationale visitatiecommissies die het Nederlandse biologische onderzoek aan universiteiten (2013-2018) en onderzoeksinstituten (2014-2018) als *state-of-the-art*-kenmerken (bijlage 13).

FIGUUR 14. DE BIOLOGISCHE WETENSCHAPPEN IN NEDERLAND VERGELEKEN MET ANDERE LANDEN PER DEELGEBIED



De gemiddelde field-weighted citation impact (fwci, zie bijlage 11) van publicaties in de biologische wetenschappen uit 2018 in internationale vergelijking.

FIGUUR 15. FWCI PER DEELGEBIED VAN DE BIOLOGIE IN NEDERLAND



In de citatie-analyse (zie bijlage 11) is per deelgebied van de biologie de field-weighted citation impact bepaald. Het wereldgemiddelde van deze kwaliteitsmaat is 1. Alle deelgebieden scoren daarmee ruim bovengemiddeld.

*Bij de Neurobiologie is gebruik gemaakt van een uitgebreide database van publicaties om een representatief beeld van dit brede deelgebied te verkrijgen.

De hoge kwaliteit blijkt ook uit het gegeven dat veel biowetenschappers in Nederland prestigieuze prijzen hebben mogen ontvangen zoals Vici-premies, ERC Advanced & ERC Synergy Grants. Omdat de grenzen tussen biologie en de brede biowetenschappen diffuus zijn noemen we hier de wetenschappers die een belangrijke bijdrage hebben geleverd aan biologische kennis en vooruitgang van het vakgebied. Ook de Nederlandse 'Nobelprijs', de Spinozapremie, is sinds 1995, 22 van de 97 maal (23 procent) toegekend aan een biowetenschapper, en de Simon Stevin meesterprijzen en Stevinpremies voor toegepast onderzoek belandden 6 van de 31 keren (23 procent) in handen van een biowetenschapper. Voor de Zwaartekrachtpremies voor excellent onderzoek geldt zelfs dat 7 van de 24 (29 procent) toegekende programma's worden geleid door een biowetenschapper (bijlage 14). Verder

BIOBASED VOEDSEL UIT ZEE

Meer dan 70 procent van ons aardoppervlak is bedekt met zout water, maar daar komt slechts 1 procent van ons voedsel vandaan. Inpassen van algen- en zeewierteelt in het natuurlijke mariene ecosysteem kan een oplossing vormen voor de huidige uitputting van traditionele landbouwgronden en kan de toenemende wereldbevolking helpen van voedsel te voorzien. Uit de geproduceerde biomassa kunnen eiwitten en koolhydraten voor menselijke consumptie worden gewonnen, de restanten kunnen worden omgezet in biogas en de overblijvende mineralen kunnen gebruikt worden als bemesting. Met meer kennis over domesticatie van wieren, van de opname van voedingsstoffen en van de selectie van hoog productieve, ziekteresistente algen en wieren ontstaat een geheel nieuw niche in de agrarische sector voor de productie van duurzaam, biobased voedsel uit zee.

Foto: Saccharina latissima, suikerwier.



hebben Nederlandse biologen een sleutelrol vervuld in bijvoorbeeld het wereldwijd op de kaart zetten van het biodiversiteitsverlies van insecten¹⁶ en de ontwikkeling van de CRISPR-Cas technologie¹⁷, die het knippen en plakken van stukjes DNA op een elegante manier mogelijk maakt.

MAATSCHAPPELIJKE EN ECONOMISCHE IMPACT

Een beter begrip van het functioneren van het leven is van cruciaal belang voor het oplossen van maatschappelijke uitdagingen. Fundamenteel biologisch onderzoek vormt daarin een onmisbare schakel. Biologie draagt bij aan een meerderheid van de SDG's geformuleerd door de Verenigde Naties. Biologie is ook van groot belang voor de ambities van de Europese *Green Deal* waarin gestreefd wordt naar een duurzaam, klimaat-neutraal Europa in 2050. Op nationaal niveau speelt biologie een belangrijke rol in het missie-gestuurde beleid van de overheid voor de toekomst in gezondheid en zorg, landbouw/water/voedsel, en ook in energietransitie, duurzaamheid en veiligheid¹⁸. Dit is tevens terug te zien in de routes van de Nationale Wetenschapsagenda (NWA; figuur 12). Hoe meer we investeren in de biologie, des te groter de kans dat we deze ambitieuze doelstellingen kunnen halen.

Het biologisch onderzoek in Nederland is intensief verweven met het bedrijfsleven. Voor maar liefst 6 van de 9 topsectoren in Nederland is biologische kennis van groot belang: Agri & Food, Chemie, Energie, Life Sciences & Health, Tuinbouw & Uitgangsmaterialen en Water & Maritiem. Deze sectoren vertegenwoordigen een productiewaarde van ongeveer 250 miljard euro¹⁹. Ook de invloed van deze sectoren op de werkgelegenheid is groot: ongeveer een half miljoen mensen is werkzaam in deze gebieden. In al deze sectoren is een evenwicht tussen fundamenteel onderzoek en toegepast onderzoek van groot belang. Nieuwsgierigheids-gedreven ontdekkingen zijn van grote invloed op de lange-termijn-overlevingskansen van het bedrijfsleven en toegepast onderzoek is vaak weer een stimulator van fundamenteel onderzoek. Het recent uitgebrachte Holland Bio verkiezingsmanifest²⁰ spreekt over een zogenaamde Bio Revolutie die gaande is en de kansen die deze biedt voor de Nederlandse Life Sciences sector voor ondernemerschap, verduurzaming van landbouw, visserij en chemie en voor preventie en gezondheid. Volgens Holland Bio heeft Nederland een beloftevolle uitgangspositie om in te kunnen spelen op deze revolutie, zoals óók blijkt uit dit sectorbeeld, maar dan is er wel politieke, maatschappelijke én wetenschappelijke inzet nodig.

Co-creatie en verbinding van wetenschap en bedrijfsleven kan leiden tot een hogere *return on investment* van de investeringen in kennis. Tijdens de voorbereidingen van dit rapport constateerden wij dat op dit moment middelen, kennis en capaciteit van biologen en kennisinstellingen onvoldoende zijn om in de volle breedte intensieve samenwerking met het bedrijfsleven aan te gaan. Via een sectorplan wil de Nederlandse biologie zich verder organiseren en de interactie met het bedrijfsleven steviger vormgeven om zo commerciële kansen te versterken en benutten. Een klassiek voorbeeld van een commerciële kans is de productie van insuline door veranderde *Escherichia coli*-bacteriën. Voorheen had je maar liefst 1000 kilo alveesklierweefsel nodig van slachtdieren om 100 gram insuline te produceren.

16 Hallmann et al., 2017. PlosOne 12:e0185809.

17 Brouns et al. 2008. Science b321:960-964.

18 Missies voor het topsectoren- en innovatiebeleid, 26 april 2019.

19 Monitor topsectoren 2017 & 2018 (CBS) en dashboard (<https://www.cbs.nl/nl-nl/visualisaties/monitor-topsectoren-2017>).

20 <https://www.hollandbio.nl/wp-content/uploads/2020/07/HollandBIO-Life-Sciences-Verkiezingsmanifest-2021.pdf>

De investeringen in bedrijven die actief zijn op het terrein van de synthetische biologie kennen wereldwijd een explosieve groei en richten zich vooral op toepassingen in de geneeskunde, voeding, energie en milieu. Ook in veel andere sectoren liggen grote commerciële kansen om nieuwe kennis te exploiteren. Zo kun je denken aan kennis van ziekten en plagen zoals de ziekte van Lyme overgebracht door teken, de eikenprocessierups of de Japanse duizendknoop die hoge kosten veroorzaken voor de samenleving. Maar ook is systeembiologische en neurobiologische kennis nodig om een behandeling of preventie van Alzheimer te realiseren, een ziekte waaraan alleen al in Nederland circa 250.000 mensen lijden. Ook liggen er kansen in de transitie naar duurzame voedselsystemen, nodig en urgent om de onacceptabele milieuvuiling, het biodiversiteitsverlies en de klimaateffecten van de huidige manier van voedselproductie tegen te gaan.

Recent nog trokken De Nederlandse Bank en het Planbureau voor de Leefomgeving de conclusie dat afname van biodiversiteit de economie in gevaar brengt. Bij het verdwijnen van soorten zoals wilde bijen, die veel voedselgewassen bestuiven, zou zo'n 510 miljard euro van Nederlandse financiële instellingen in gevaar komen²¹. Banken, verzekeraars en pensioenfondsen wereldwijd hebben dit bedrag uitstaan bij bedrijven die geheel of gedeeltelijk afhankelijk zijn van ecosysteemdiensten, de diensten van de natuur bijvoorbeeld bestuiving door insecten.

²¹ Biodiversiteit en de financiële sector: een kruisbestuiving? De Nederlandse Bank en Planbureau voor de Leefomgeving, juni 2020.



GENE EDITING

CRISPR-Cas is een recent ontdekt afweersysteem dat bacteriën gebruiken als bescherming tegen bacteriële virussen. CRISPR is als een archief in het bacteriële DNA, waarin korte stukjes virus DNA zijn opgeslagen. De informatie uit het CRISPR archief wordt gebruikt om CRISPR-geassocieerde (Cas) enzymen te helpen bij het heel nauwkeurig opsporen van de bijpassende DNA-code van een binnengedrongen virus, en dat dan kapot te knippen. Nederlandse biologen lieten als eersten zien dat met een synthetische CRISPR de specificiteit naar believen kan worden veranderd, en dat zodoende elke DNA-code kan worden gevonden (en aangepast). De succesvolle transplantatie van het bacteriële CRISPR-Cas systeem naar andere organismen heeft geleid tot een revolutie voor genoomaanpassing in zowel fundamenteel als toegepast onderzoek, van plantenbiotechnologie (tarwe zonder gluten) tot genterapie (genezen van genetische ziekten). Terwijl Nederland ook als pionier zou kunnen meewerken aan de doorontwikkeling van CRISPR-gerelateerde innovaties, wordt dat vooralsnog bemoeilijkt door strikte Europese regels. In 2020 is een nobelprijs toegekend voor de ontwikkeling van CRISPR-Cas.



WAT GEBEURT ER IN ONZE HERSENEN?

Neurobiologen onderzoeken wat er in de hersenen gebeurt wanneer je iets denkt, waarneemt of wanneer je een actie plant. Deze hersenprocessen worden uitgevoerd door grote groepen hersencellen die verspreid liggen over verschillende hersengebieden. Een belangrijke vraag is hoe deze hersencellen samenwerken om denkprocessen mogelijk te maken. De mogelijkheden om de activiteit van grote aantallen hersencellen te meten en te veranderen nemen snel toe. Zo konden Nederlandse onderzoekers recent aantonen wat er zich afspeelt in de hersenen wanneer een visuele prikkel in het bewustzijn doordringt en hoe beslissingen verschillende hersengebieden in een specifieke volgorde actief maken.

Begrip over de werking van onze hersenen is van groot maatschappelijk belang. Nederlandse onderzoeksgroepen leveren fundamentele kennis die van belang is voor onder andere het begrip van Multiple Sclerose, Parkinson en depressie. Ook ontwikkelden zij een prothese die een camera rechtstreeks aansluit op de visuele hersenschors om blinden een rudimentair zicht terug te geven.

ACADEMISCH BIOLOGIE-ONDERWIJS EN WERKGELEGENHEID

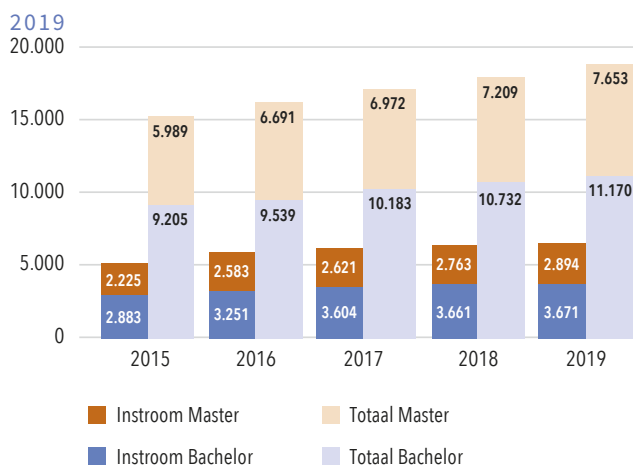
De wetenschappelijke benaderingswijze van de biologie heeft in de meest recente decennia grote veranderingen ondergaan, wat geresulteerd heeft in de zogenaamde ‘Nieuwe Biologie’. De huidige biologie is doorgedrongen tot de bouwstenen van het leven, is sterk kwantitatief van aard en is sterk geïntegreerd met andere disciplines en toepassingsgebieden. Nieuwe technologieën hebben grote mogelijkheden gecreëerd voor biologisch onderzoek en hebben de spanwijdte van de biologie enorm vergroot. Van belang is dat het biologie-onderwijs aan de universiteiten blijft aansluiten bij deze snelle ontwikkelingen en biologen opleidt met de juiste bagage.

INSTROOM EN KWALITEIT

De zeven algemene universiteiten (Amsterdam (UvA en VUA), Leiden, Groningen, Nijmegen, Maastricht en Utrecht) en Wageningen University bieden een brede basis aan in academisch biologie-onderwijs. Er zijn op dit moment 27 biologie- en biologie-gerelateerde bacheloropleidingen en 40 masteropleidingen (bijlage 15). Het universitaire biologiebacheloronderwijs staat hoog aangeschreven en wordt bij de onderwijsbeoordelingen doorgaans als voldoende tot goed beoordeeld (goed is de hoogst mogelijke beoordeling). Verder geven de studenten²² aan tevreden te zijn over de biologiemasteropleidingen, maar werkgevers zien naast een aanzienlijk aantal positieve zaken ook ruimte voor verbetering.

Om de versnelling in de biologie te realiseren via meer experts, kennis en infrastructuur en daardoor bij te dragen aan het oplossen van maatschappelijke uitdagingen, zijn voldoende afgestudeerde biowetenschappers met kwalificaties die aansluiten bij de behoeften van de

FIGUUR 16. INSTROOM EN TOTAAL AANTAL STUDENTEN VAN 2015 TOT

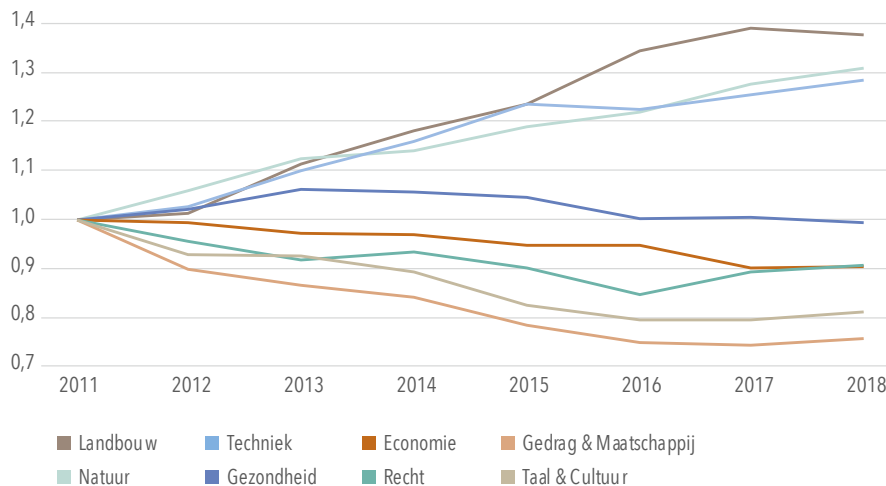


De landelijke instroom van eerstejaars bachelor- en masterstudenten en het totaal aantal studenten in de biologie- en biologie-gerelateerde opleidingen genoemd in bijlage 15, in de academische jaren 2015 tot en met 2019.

22 Nationale Alumni Enquête, 2017.

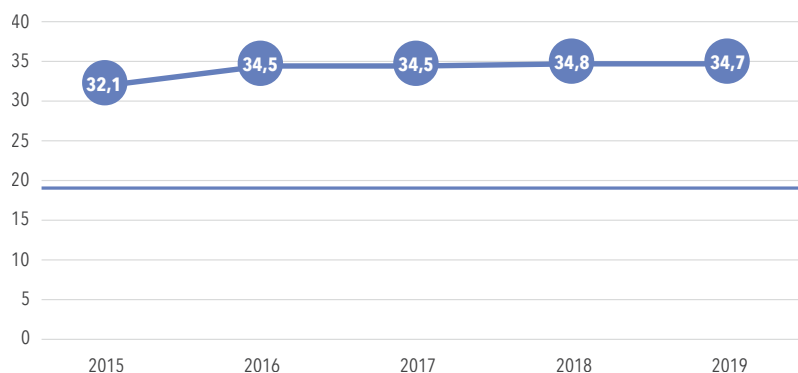
arbeidsmarkt onontbeerlijk. De instroom in biologie-opleidingen is al een aantal jaren fors aan het toenemen. Zo is de bachelorinstroom in de algemene biologiebachelors in Nederland van 2883 studenten in 2015 gestegen naar 3671 in 2019; een toename van maar liefst 27 procent (figuur 16; bijlage 12). Het ziet ernaar uit dat deze ontwikkeling zich nog een aantal jaren zal voortzetten met een verwachte toename in de periode 2019 tot 2024 van 20 tot 30 procent. Deze groei toont de grote interesse bij jongeren voor het werken aan biologische vraagstukken.

FIGUUR 17. VERLOOP STUDENT/STAF-RATIO SINDS 2011



Het verloop van de student/staf-ratio per HOOP-gebied (Hoger Onderwijs en OnderzoeksPlan (HOOP)-gebied) 2011-2018, relatief aan de waarde in 2011. De ratio is de verhouding van het aantal ingeschreven studenten (alleen hoofdinschrijvingen, peildatum 1 oktober) per HOOP-gebied en het wetenschappelijk personeel betrokken bij het onderwijs (hoogleraren, (U)HD's en overig onderwijzend personeel). Duidelijk zichtbaar is de groei in de voor biologie relevante gebieden Landbouw en Natuur. Bron: IHO en HOPI.

FIGUUR 18. STUDENT/STAF-RATIO LANDELIJKE BIOLOGIE-OPLEIDINGEN



De verhouding tussen ingeschreven studenten in de in bijlage 15 genoemde bachelor- en masteropleidingen en het aantal FTE wetenschappelijke staf in vast dienstverband in de biologische instituten van de universiteiten in bijlage 9, over de academische jaren 2015 tot en met 2019. Tevens weergegeven is de landelijke benchmark bij een verhouding van 19 studenten per stafid.

De enorme instroom in biologische opleidingen resulteert echter wel in een zeer hoge student/staf-ratio. In een vergelijking van een aantal wetenschapsvelden (de zogeheten Hoger Onderwijs en Onderzoek Plan (HOOP) gebieden) blijkt dat de grootste groei in de student/staf-ratio gedurende het afgelopen decennium zichtbaar was in de gebieden landbouw, natuur en techniek (figuur 17). Over de forse stijging van de student/staf-ratio's bij de biologie zijn al zorgen geuit in diverse visitatierapporten²³. Landelijk is de gemiddelde student/staf-ratio in de periode 2007-2018 over alle universiteiten en disciplines rond de 19²⁴. Ervan uitgaande dat 19 dus gezien kan worden als een benchmark, dan zijn de student/staf-ratio's bij de landelijke biologie-opleidingen extreem hoog (gemiddeld 34,7 in 2019; figuur 18). Het verschil tussen benchmark en realiteit is nog schrijnender als we ons realiseren dat biologie-opleidingen op experimentele vaardigheden gerichte opleidingen zijn met veel contactmomenten in de vorm van practica, excursies en veldwerk. Gezien de enorme jaarlijkse instroom bij de biologie-opleidingen is het niet vreemd dat deze belangrijke onderwijsvormen onder druk staan. Met de investering van veel vrije tijd probeert de sector te voorkomen dat de hoge student/staf-ratio leidt tot een vershraling van het onderwijs door bijvoorbeeld het schrappen van practica en veldwerk. Deze situatie is niet langer houdbaar en zeer onwenselijk. Het heeft gevolgen voor het studierendement en leidt tot een gebrek aan onderwijsinnovatie. Er is dan ook een dringende behoefte aan meer onderwijscapaciteit. Daarnaast wil de sector het studierendement onder de loep nemen en gezamenlijk de noodzakelijke onderwijsinnovaties in kaart brengen.

In tegenstelling tot veel van de andere bètaopleidingen in Nederland kennen de biologie-opleidingen zowel in de bachelor- als in de masteropleiding een evenwichtige genderverdeling.

WERKGELEGENHEID VOOR BIOLOGEN

Uit de Nationale Alumni Enquête (2017) blijkt dat afgestudeerde biologen snel werk vinden. Uit NIBI-onderzoek onder afgestudeerde masterstudenten uit 2019 blijkt dat ruim de helft van hen terecht komt in de Life Sciences & Health sector, terwijl 14 procent werk vindt in de sector Ecologie, Evolutie, Milieu en Duurzaamheid. Hieruit blijkt dat de brede biologieopleiding van belang is voor uitstroom naar een breed scala van de biowetenschappen. Ruim 50 procent van de afgestudeerden vindt een baan in het onderzoek. Hiervan volgt de grootste groep een promotietraject²⁵.

Om de biologische kennis in Nederland te versnellen en te vergroten moeten de meest getalenteerde studenten snel kunnen beginnen met een promotietraject en moeten de allerbesten kunnen doorstromen naar vaste posities binnen de universiteiten en instituten. Dit blijkt niet altijd eenvoudig te zijn. Er zijn weinig mogelijkheden voor talenten om een vast dienstverband te bemachtigen, terwijl dat nu juist een voorwaarde is voor het verkrijgen van prestigieuze beurzen binnen een aantal (NWO-)programma's. Ook is het moeilijk toptalenten met Europese beurzen (ERC Starting Grant, ERC Consolidator Grant) voor Nederland te behouden. Nederland kan aantrekkelijker worden voor wetenschappers door meer structurele dienstverbanden aan te bieden, de onderwijsdruk te verlagen, de slagingskansen van beursaanvragen te verhogen en betere startpakketten aan te bieden voor jonge onderzoekers. Biologen komen niet alleen terecht in de wetenschap, maar zijn ook te vinden in beleid,

23 Visitatierapporten biologie, VSNU, <https://www.nvao.net/nl/besluiten/opleidingen>

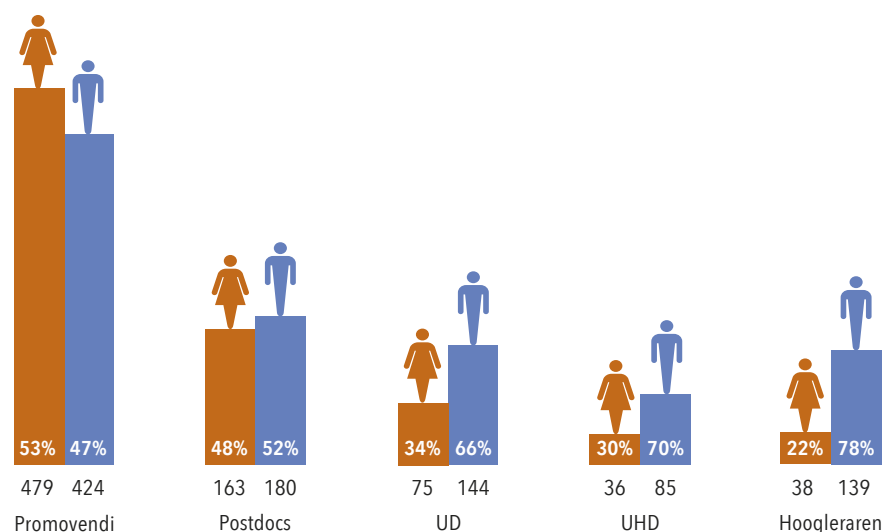
24 VSNU, <https://vsnu.nl/studentengroei.html>

25 Arbeidsmarktinventarisatie afgestudeerde masterstudenten, NIBI 2019.

R&D-afdelingen van bedrijven, adviesfuncties, communicatie en basis-, middelbaar, MBO- en HBO-onderwijs. Aansluiting van de biologieopleidingen op dit brede scala aan uitstroomrichtingen is daarom ook van groot belang.

Net als in de opleiding is ook in het promotietraject en de hierop volgende postdoctorale fase de genderverdeling in balans. Tijdens de universitair docent- en hoofddocentfase en de hoogleraarfase treedt echter in toenemende mate scheefgroei op (figuur 19). Zo is het aantal vrouwelijke hoogleraren laag (kleiner dan 25 procent), als gevolg waarvan veel talent ongebruikt blijft voor de biologie.

FIGUUR 19. GENDERVERDELING WETENSCHAPPELIJK PERSONEEL BIOLOGIE



De genderverdeling per functieniveau (hoogleraren, universitair hoofddocenten, universitair docenten, postdocs en promovendi) in aantallen FTE van de biologische instituten van de universiteiten in 2020.

BEHOEFTES VAN WERKGEVERS

De biologische beroepsvereniging (NIBI) heeft in 2014 en 2019 een enquête²⁶ uitgevoerd onder werkgevers die biowetenschappers in dienst hebben en nemen. De ondervraagde werkgevers blijken graag breed opgeleide medewerkers te rekruteren en te hechten aan een stevige inhoudelijke kennisbasis. Werkgevers zijn tevreden met het kennisniveau van afgestudeerde biologen en waarderen de systeembenadering die biologen en biomedische wetenschappers in hun opleiding hebben ontwikkeld. Biologen leren verbanden te leggen en complexiteit te ontrafelen. In de huidige wereld is hier grote behoefte aan. Onder werkgevers bestaat echter de zorg dat de brede biologische kennisbasis in gevaar komt doordat studenten al heel vroeg in de opleiding een richting moeten kiezen. Plantenveredelingsbedrijven geven aan met name behoefte te hebben aan afgestudeerde biologen met een degelijke plantenfysiologische kennis ('groene vingers') en een affiniteit met het bedrijfsleven²⁷. Tot slot is basale soortenkennis van planten en dieren voor veel ecologisch en biodiversiteitsonderzoek van groot belang. Veldwerk en excursies zijn dan ook belangrijke componenten van een evenwichtig curriculum.

26 Arbeidsmarktonderzoeken Biowetenschappen en Biomedische Wetenschappen In Nederland, december 2014 en 2019/2020 .

27 Mondelinge communicatie leden Plantum januari 2020.

De door werkgevers genoemde kennisvelden en vaardigheden van de toekomst omvatten bioinformatica en het kunnen omgaan met grote datasets, gebaseerd op een gedegen kennis van wiskunde en statistiek. Dit is nodig om processen en verbanden adequaat te kunnen beschrijven en om data te verzamelen, te verwerken en te interpreteren.

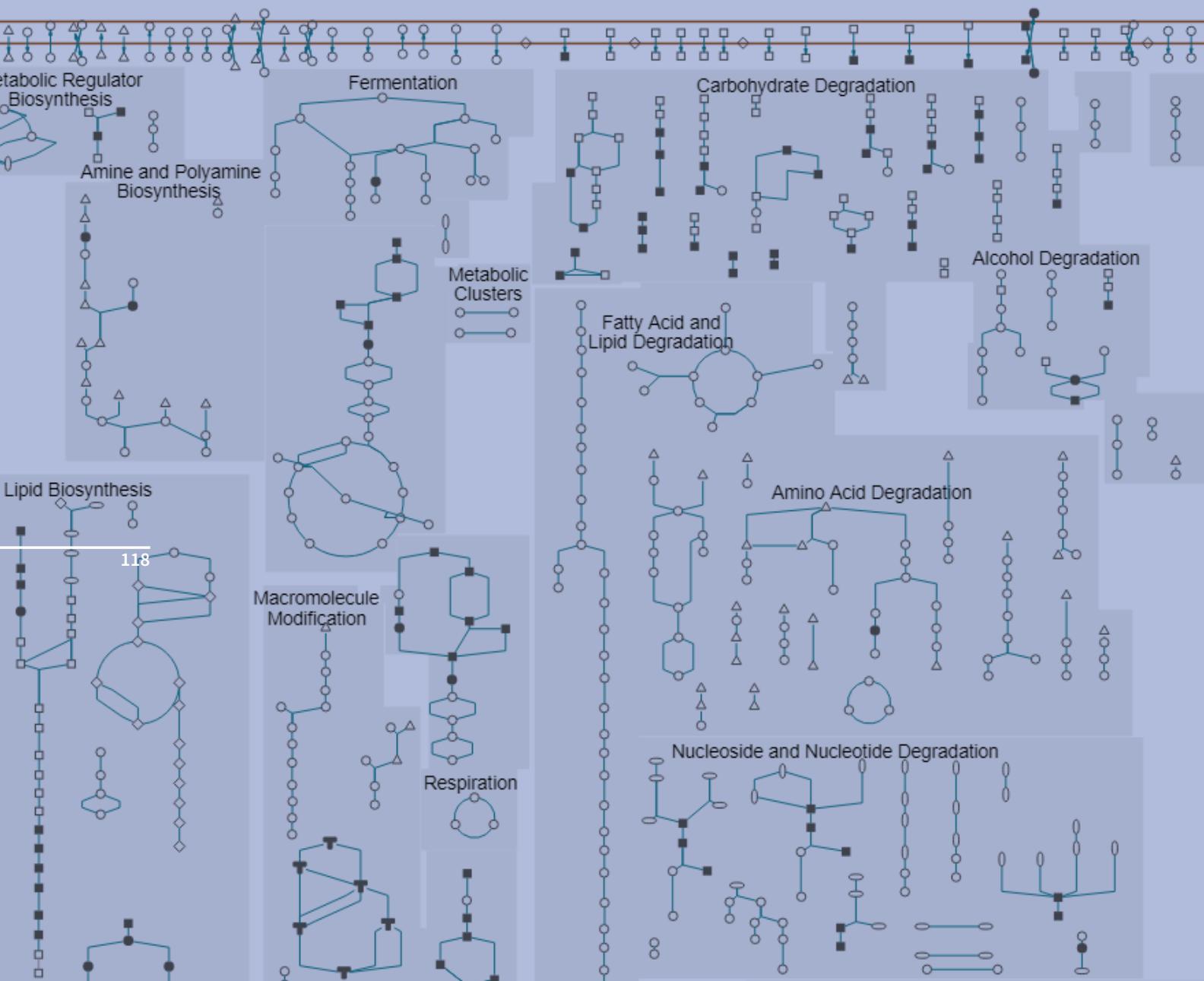
Onder werkgevers is ook behoefte aan goed ontwikkelde communicatieve vaardigheden en het vermogen om in interdisciplinaire teams te kunnen werken. Een verbeterpunt bij veel afgestudeerden betreft de vaardigheid om onderzoeksgegevens te vertalen naar een Nederlands beleidsrapport, wat interdisciplinaire en transdisciplinaire ervaring vereist. Ten slotte gaven veel geënquêteerden aan dat de meeste afgestudeerden nauwelijks in staat zijn om bedrijfsmatig te denken. Dit is van belang bij interacties tussen klanten en het bedrijf en bij het maken van strategische keuzes.

Samenvattend concluderen we dat de huidige universitaire biologiecurricula beter moeten aansluiten bij de behoeften van de maatschappij. De bacheloropleidingen biologie moeten een brede basis blijven aanbieden, zowel qua inhoud als qua vaardigheden. Voor toekomstige biologen is het daarnaast van groot belang dat ze beter en omvangrijker opgeleid worden in bioinformatica, modelleren, *data science*, en veld- en soortenkennis. Ook moeten studenten voorbereid worden op een baan in een interdisciplinair werkveld, waarin ze vaak met deskundigen uit de life sciences, natuurwetenschappen en sociale wetenschappen moeten samenwerken. Toekomstige curricula moeten dan ook meer aandacht gaan besteden aan communicatieve vaardigheden, ondernemen en multidisciplinair, interdisciplinair en transdisciplinair samenwerken.

WEGENKAARTEN VAN DE CELLULAIRE STOFWISSELING

Cellulaire stofwisseling, metabolisme, is belangrijk voor het leveren van bouwstenen en energie. Metabolisme is daarom essentieel voor ieder leven. Vele ziektes hebben een belangrijke metabole component, niet alleen diabetes en hart- en vaatziektes (hoog cholesterol), maar ook kanker, immuunziektes of aandoeningen van het zenuwstelsel. In de biotechnologie zorgt metabolisme van micro-organismen voor lekker (gefermenteerd) eten en biobrandstoffen. Systeembiologen kunnen modellen maken van alle chemische reacties die in cellen kunnen plaatsvinden – een soort wegenkaarten waarmee de chemische verkeersstromen kunnen worden uitgerekend. Dit maakt het mogelijk om de metabole capaciteit en activiteit van organismen, of zelfs van individuele cellen te voorspellen. Ze worden gebruikt om biotechnologische processen te verbeteren waaronder vaccinproductie, het produceren van bio-chemicaliën, en om verstoringen in stofwisseling bij ziekte beter te begrijpen.

Afbeelding: Onderdeel van de metabole wegenkaart van een cel, in dit geval van de darmbacterie *Escherichia coli*. Bron: de EcoCyc database (ecocyc.org)



HOE KAN DE BIOLOGIE DE UITDAGINGEN AAN?

STEVIGE UITGANGSPOSITIE

De biologie in Nederland staat in de startblokken om haar sterktes te benutten en kansen te grijpen om onze samenleving, onze economie en onze wereld vooruit te helpen door een beter begrip van het leven. Fundamentele biologische kennis en de nieuwsgierigheid gedreven zoektocht naar mechanismen en principes zijn, zoals in het hoofdstuk Biologie als basis voor een gezonde wereld wordt beschreven, onontbeerlijk voor het aanpakken van de grote maatschappelijke uitdagingen waarvoor de wereld zich in de 21^e eeuw gesteld ziet. De biologie in Nederland is inhoudelijk en organisatorisch krachtig gepositioneerd om deze rol te vervullen, zoals blijkt uit de hoofdstukken Benodigde biologische kennis en Organisatie en impact van de biologie. Het wetenschappelijk onderzoek is van uitstekende kwaliteit, er is een sterke basis in de volle breedte van de biologie, het onderzoek sluit naadloos aan bij de verschillende beleidsagenda's op nationaal en internationaal niveau, en de discipline is goed georganiseerd. Jongeren zijn gemotiveerd om te werken aan biologische vraagstukken, en studenten beoordelen de kwaliteit van de Nederlandse opleidingen als goed, zoals blijkt uit het hoofdstuk Academisch biologie-onderwijs en werkgelegenheid. De kwaliteit van onderwijs en onderzoek staat echter onder druk als gevolg van een gebrek aan middelen. Extra investeringen zijn nu nodig om het Nederlandse biologieonderzoek en -onderwijs optimaal te laten aansluiten op de behoeften vanuit de maatschappij, en om de kansen die zich nu voordoen te kunnen benutten. En kansen zijn er in deze sector! De analyse van de positie van de Nederlandse academische biologie levert het volgende beeld op in de vorm van een 'SWOT' (op pagina 120), zoals onderbouwd is in de voorgaande hoofdstukken van dit sectorbeeld.

Sterktes

- Wetenschappelijk uitstekend (visitaties, ERC's, Spinoza's, veel toppublicaties).
- Sterke basis in onderzoek in de volle breedte van de biologie met veel integratief onderzoek over organisatieniveaus heen.
- Jaarlijks sterk groeiende studentenpopulatie.
- Hoge relevantie voor maatschappelijke vraagstukken: aansluiting bij meerderheid NWA-routes, missie-gedreven beleid (topsectoren), en VN SDG's.
- Goed georganiseerde discipline (NWO-werkgemeenschappen, LIFE congres, NIBI, nationale en (inter)nationale consortia).
- Veel raakvlakken met naburige disciplines, bereidheid om multi-, inter- en transdisciplinair te werken.

Zwaktes

- Middelen voor inhoudelijke vernieuwing beperkt (bijvoorbeeld *data science*, systeembio, complexiteit).
- Infrastructuurmiddelen onvoldoende voor *state-of-the-art* (experimenteel) onderzoek.
- Praktische (lab-)training en veldervaring voor studenten staat onder druk door te hoge werkdruk.
- Middelen, kennis en capaciteit van kennisinstellingen om intensieve samenwerking met externe (publieke/private) partners (van MKB tot multinationals) aan te gaan zijn te beperkt.
- Beperkte diversiteit, genderbalans in de vaste (hogere) posities kan beter.
- Suboptimale aansluiting curricula op behoeften van de werkgevers.

Kansen

- Potentie om urgente maatschappelijke uitdagingen en (internationale) verplichtingen rond SDG's zoals klimaat, biodiversiteit, water, duurzaamheid, oceanen, voedsel aan te pakken.
- Co-creatie met sectoren belangrijk voor de Nederlandse economie (agro, biotech, farma, milieutechnologie) met hoge *return on investment*.
- Groeipotentieel voor R&D-investeringen.
- Biologische wetenschappers kunnen een belangrijke rol spelen in grote EU-programma's (Horizon Europe, Greenddeal).

Bedreigingen

- Student/staf-ratio buitengewoon hoog, hetgeen zowel onderwijs als onderzoek bedreigt.
- Onderschatting van belang van fundamentele biologie voor maatschappelijke uitdagingen en innovatief vermogen van Nederland.
- Sterke concurrentie om beurzen (NWO, ERC, Horizon Europe, Infrastructuur Roadmaps).
- Maatschappelijke zorgen en private baten vloeien niet (deels) terug naar investeringen in de wetenschap.
- Toptalent kiest voor andere landen of verlaat wetenschap door gebrek aan middelen/perspectief.

DE TOEKOMST

Biologisch Nederland zal ook in de toekomst een belangrijke bijdrage leveren aan nationale en wereldwijde maatschappelijke uitdagingen. Binnen de discipline biologie heeft het initiatief om tot dit sectorbeeld te komen geleid tot een verdere zelforganisatie van het veld en tot nieuw elan (zie ook de afscheidsrede van Wim van Saarloos²⁸). De sector is krachtig en bereid gezamenlijk op te treden en samen te investeren in versnelling en vergroting van de nationale fundamentele biologische kennis, technologie en experts. De sector biologie wil daarom nu gezamenlijk duurzame plannen ontwikkelen via een integraal sectorplan biologie. De belangrijkste onderdelen van dit plan zullen zijn:

BIOLOGISCHE KENNIS ALS VLIEGWIEL VOOR SOCIO-ECONOMISCHE INNOVATIES

Stimulering van het fundament van de biologie leidt tot een vliegwieleffect dat uniek kan zijn in de wereld. Kennis zal zijn weg vinden naar vele innovatieve bedrijfssectoren die voor Nederland belangrijk zijn of steeds belangrijker worden. Investering in nieuwe kennis, infrastructuur en talent leidt tot vergroting van het begrip van de moleculaire en cellulaire bouwstenen van het leven, van het aanpassingsvermogen van het leven – inclusief de mens – aan veranderende omstandigheden, en van het gedrag van complexe biologische systemen. Publiek-private samenwerking leidt tot innovaties voor de grote uitdagingen waar we voor

²⁸ Wim van Saarloos (2020). Meer wetenschap in Nederland: hoe we onze samenwerking, diversiteit en kracht verder kunnen versterken.

staan: een lang leven in goede gezondheid, een schone leefomgeving; behoud van biodiversiteit; een circulaire en duurzame voedselproductie en de ontwikkeling van voedselgewassen met verhoogde weerstand tegen ziekten, plagen en klimaatverandering.

Met nieuwe investeringen zal de sector inzetten op het stimuleren van co-creatie en de samenwerking met de maatschappij en het bedrijfsleven intensiveren om meer commerciële kansen te creëren en benutten. De ambitie is een bloeiend ecosysteem te vormen om als maatschappij optimaal rendement te kunnen halen uit de verstevigde biologische kennisbasis. Dit is het moment om dit vliegwiel in gang te zetten en een versnelling in biologische ontdekkingen te realiseren die een grote betekenis zullen hebben voor het welzijn en de welvaart van Nederland.

VERNIEUWENDE TECHNOLOGIE EN INFRASTRUCTUUR

Geavanceerde en hoogwaardige instrumentatie en krachtige data-analyse zijn voorwaarden voor het genereren van nieuwe kennis. Op dit moment is de Bio revolutie gaande, gedreven door technologie. Vernieuwende technologie maakt het mogelijk om de wereld van het onbekende binnen te stappen en grensverleggende fundamentele ontdekkingen te doen, die een weg vinden naar een toepassing voor het oplossen van grote maatschappelijke uitdagingen. De vernieuwende technologie zelf, vaak in interdisciplinair verband ontwikkeld, biedt regelmatig grote kansen voor commerciële en maatschappelijke toepassing. Denk bijvoorbeeld aan de enorme mogelijkheden voor toepassing van de CRISPR-Cas technologie. Nationale en internationale krachtenbundeling is nodig om effectief met de inzet van middelen om te gaan. Nederland kan een leidende rol spelen in de ontwikkeling van grote infrastructuur. De sector heeft de kennis in huis, en wil zich zo organiseren dat als sector op nationaal niveau strategische keuzes kunnen worden gemaakt, want Nederland is te klein om in alle Europese initiatieven in de Life Sciences te participeren. Vanwege de essentie van vernieuwende technologie pleit dit sectorbeeld voor een significante vergroting van de middelen voor nationale infrastructuurprogramma's, vergroting van de Nederlandse participatie in internationale initiatieven (European Strategy Forum on Research Infrastructures (ESFRI), European Molecular Biology Laboratory (EMBL), European Research Infrastructure Consortium (ERIC)) en een effectieve inzet van middelen voor publiek-private samenwerking in de ontwikkeling en het gebruik van nieuwe methoden en instrumenten in de biologie. Vernieuwende technologie is immers een belangrijke *enabler* voor het ontsluiten van biologische kennis én vormt een basis voor het innovatief vermogen van de sector.

TALENT AANTREKKEN EN BEHOUDEN

Om de biologische kennis snel te vergroten wil de biologie meer jonge, talentvolle wetenschappers aanstellen in strategisch gekozen velden, maar zeker ook in de kwantitatieve biologie, een veld dat van groot belang is voor de verdere ontrafeling van biologische mechanismen en principes.

Daarbij is het cruciaal dat we de beste jonge wetenschappers meer perspectief kunnen bieden op een carrière in de wetenschap aan Nederlandse kennisinstellingen. De meeste Nederlandse universiteiten zijn op dit moment niet in staat om competitieve startpakketten aan te bieden aan geïnteresseerde toptalenten. Een tekort aan vaste dienstverbanden, de zeer hoge werkdruk en de sterke competitie om onderzoeksbeurzen leiden op dit moment tot te weinig kansen voor jonge mensen, waardoor te veel talent voortijdig de Nederlandse wetenschap verlaat.

Daarnaast moet de diversiteit worden bevorderd: er moeten meer mensen met diverse (culturele) achtergronden en meer vrouwelijk talent op wetenschappelijke topposities worden aangenomen. Voor een sector waarbij de instroom voor de helft uit vrouwelijk talent bestaat, is het urgent om ook in de hogere vaste posities een betere genderbalans te creëren. Wanneer er sectorplanmiddelen volgen zal de sector versnelling aan kunnen brengen in het realiseren van grotere diversiteit op de hogere wetenschappelijke posities.

VERLAGEN STUDENT/STAF-RATIO

Momenteel heeft de landelijke biologie een student/staf-ratio van ruim 34. Het gevolg hiervan is dat wetenschappers onevenredig veel tijd aan onderwijs moeten besteden. Dit gaat ten koste van baanbrekend wetenschappelijk onderzoek. De hoge student/staf-ratio leidt bovendien tot een verschraving van het onderwijs, door het schrappen van practica, veldwerk en excursies, en een gebrek aan onderwijsinnovatie. En dat in een tijd dat de curricula juist, gezien de maatschappelijke en interdisciplinaire uitdagingen, aan vernieuwing toe zijn. Wanneer Nederland wil investeren in biologische kennis is het noodzakelijk de student/staf-ratio structureel te laten dalen tot de landelijke VSNU-benchmark van 19 studenten per staflid.

BETERE EXPERTS DOOR BETERE OPLEIDINGEN

De snelle maatschappelijke en technologische veranderingen vragen om investeringen in vernieuwing van biologiecurricula. Innoveren en versterken van het onderwijs betekent inzet op ontwikkeling van dynamische en vernieuwende curricula die optimaal aansluiten en mee evolueren met de behoeften van de maatschappij. De biologen van de toekomst moeten een topopleiding krijgen in de toepassing van moderne instrumentatie en in de kwantitatieve biologie met versterkte kennis van bioinformatica, modelleren, *data science* en kunstmatige intelligentie. Voldoende aandacht is nodig voor veld- en soortenkennis. Studenten van vandaag moeten in staat zijn te werken in multi-, inter- en transdisciplinaire teams en worden getraind in ondernemerschap. De interactie tussen het wetenschappelijk onderwijs en het bedrijfsleven in bijvoorbeeld de plantenveredeling, biologische gewasbescherming, biotechnologie, en de biomedische sector, alsook de samenwerking met publieke partijen zoals gemeenten, provincies, waterschappen en gezondheidsinstellingen moet worden versterkt. Dit kan onder andere door het versterken van kennis- en innovatie netwerken, uitwisseling van stages en het opzetten van gezamenlijke programma's voor *life long learning* om nieuwe kennis te delen en co-creatie te bevorderen.

De Nederlandse biologie is eensgezind, kijkt uit naar de toekomst en wil graag stevig bijdragen aan een mooie toekomst voor Nederland en de wereld. Zij doet dat in nauwe samenwerking met de andere bèta- en technieksectoren. Een sterke motivatie is voelbaar; nu is het zaak deze motivatie om te zetten in een integraal sectorplan. Biologie Nederland wil het gesprek aangaan met het ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap (OCW), maar gezien de breedte van de biologie ook met de ministeries van Economische Zaken en Klimaat (EZK), Volksgezondheid, Welzijn en Sport (VWS), en Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV) om het belang van fundamenteel onderzoek in de discipline biologie voor het voetlicht te brengen. Verdieping en uitbreiding van fundamentele biologische kennis is noodzakelijk voor de aanpak van de belangrijkste maatschappelijke uitdagingen van dit moment en daarvoor voor het behoud van ons welzijn en het floreren van onze economie en welvaart.



SLAAPTEKORT? DIT IS HET GEVOLG

Het ritme van dag en nacht is van grote invloed op onze alertheid, cognitie, spijsvertering, gedrag, pijnsensatie en medicijngevoeligheid. Deze processen staan allemaal onder invloed van onze biologische klok, die ons gedrag en onze fysiologie aanpast. Tijdens onze slaap vervult ons brein essentiële functies op gebied van zenuwherstel en cognitieve verwerkingsprocessen. Verschuivingen in ons biologische ritme door kunstlicht, de 24/7 maatschappij, ploegendienst, jet-lag, zomertijd en klimaatopwarming kunnen leiden tot obesitas, suikerziekte, verhoogde gevoeligheid voor infectieziekten, kanker, depressie, verkeersonveiligheid en sociale jetlag (bijvoorbeeld door de mismatch tussen schooltijden en de biologische klok van kinderen). Daglicht en kunstlicht kunnen deze klokken weer verschuiven, net als timing van voeding, life-style, en opgroeiomstandigheden. Biologisch onderzoek vergroot ons begrip van dit samenspel van de biologische klokken in ons lichaam. Dit type onderzoek werd in 2017 beloond met een Nobelprijs.

DE LANGE ARM VAN DE MOEDER

De laatste tijd is door fundamenteel biologisch onderzoek aan het licht gekomen dat de omgeving moeders fysiologie al tijdens de vroege zwangerschap kan beïnvloeden, waardoor delen van het DNA van hun kinderen uit of aan gezet worden (epigenetische veranderingen). Door de evolutie is dit proces geselecteerd om de ontwikkeling van het nageslacht snel te kunnen aanpassen aan de omgeving waarin volgende generaties zullen opgroeien. Zo bleek dat watervlomoeders die leefden in een omgeving met rovers hun kinderen grote afweerstekels meegaven. Bij de mens is het langetermijngevolg van de hongerwinter bekend, waarbij ondervoeding in een vroeg stadium van de zwangerschap grote gevolgen had voor het latere metabolisme, de stress-gevoeligheid en de cognitieve capaciteit van de kinderen. Deze eigenschappen konden zelfs tot in de volgende generaties invloed hebben. Een beter begrip hiervan is onontbeerlijk om ontsporingen in gedrag en fysiologie te voorkomen of bij te sturen.





BIJLAGEN

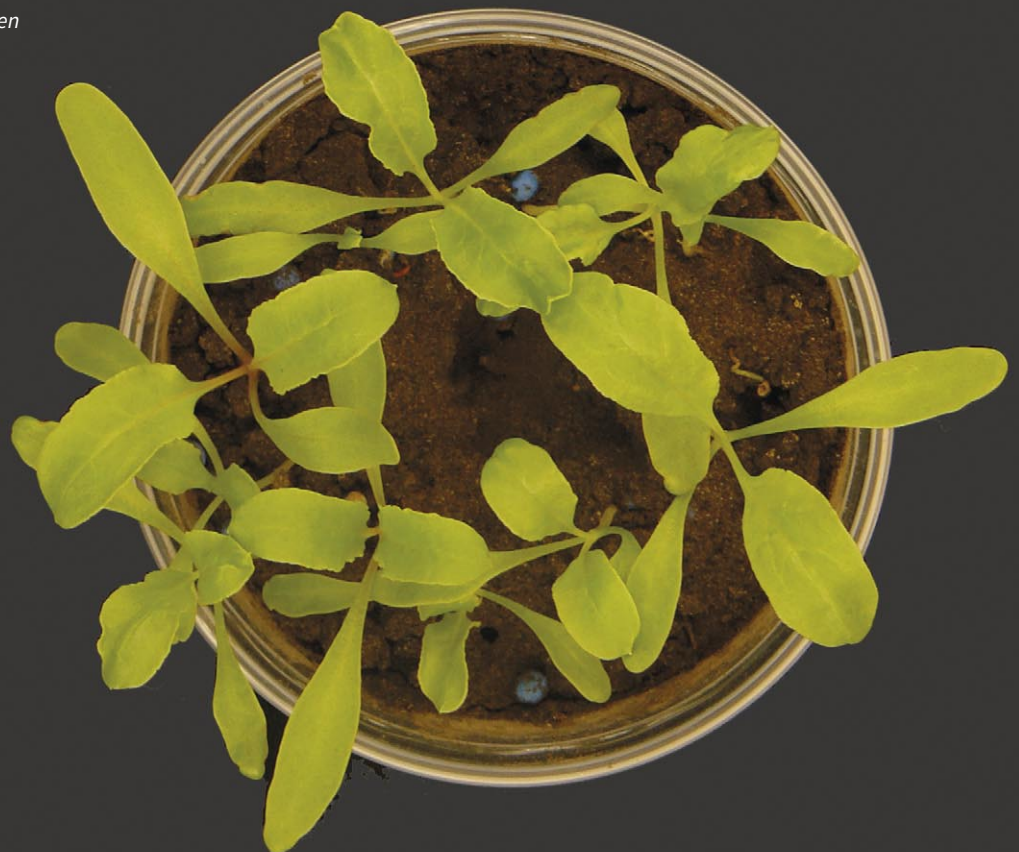
BACTERIËN ALS BESCHERMERS

Sommige bacteriën, schimmels en gisten maken ons ziek. Velen zijn echter juist onze vrienden. Biologen kunnen karakteristieke functies aan specifieke micro-organismen koppelen. Darmbacteriën blijken bijvoorbeeld een zeer belangrijke stof te maken die helpt darmkanker te voorkomen en een overactief immuunsysteem te normaliseren. Met deze kennis kunnen biologen een grote bijdrage leveren aan het voorspellen of iemand aanleg heeft voor bepaalde aandoeningen, zodat op tijd met preventieve maatregelen gestart kan worden en voeding kan worden afgestemd op individuele behoeften.

Planten herbergen miljarden micro-organismen. De gunstige eigenschappen van deze microbiële gemeenschap kunnen we inzetten voor onze landbouwgewassen. Bepaalde wortelbacteriën verbeteren de groei en stressbestendigheid, en andere bieden bescherming tegen ziekten en plagen. Door deze bacteriën slim in te zetten hebben we voor de duurzame gewassen van de toekomst minder mest en pesticiden nodig.

Een internationaal onderzoeksteam waaraan Nederland deelneemt toonde in suikerbiet de bescherming tegen schimmelinfectie aan en ontwikkelde vervolgens microscopisch kleine hulptroepen in de vorm van gunstige bacteriefamilies die planten kunnen beschermen. Het landelijke Zwaartekracht-programma MiCRop zoekt verder naar manieren om landbouwgewassen te versterken.

Foto: Gunstige micro-organismes beschermen suikerbiet tegen pathogene schimmel.



BIJLAGE 8. SAMENSTELLING TASKFORCE

- Rens Voeselek, voorzitter, Universiteit Utrecht
- Stanley Brul, Universiteit van Amsterdam
- Jacintha Ellers, Vrije Universiteit Amsterdam
- Roy Erkens, Universiteit Maastricht
- Ton Grootuis, Rijksuniversiteit Groningen
- Mike Jetten, opgevolgd door Paul Tiesinga, Radboud Universiteit
- Geert de Snoo, Nederlands Instituut voor Ecologie (NIOO-KNAW), namens de instituten
- Richard Visser, Wageningen University
- Gilles van Wezel, Universiteit Leiden

DE TASKFORCE WERD ONDERSTEUND DOOR

- Marjolein Robijn, NWO
- Ansa Baykuş-Wasim, NWO
- Ana de Castro, NWO
- Liesbeth Noor, Universiteit Utrecht
- Twan Maintz, Universiteit Utrecht
- Sonja Knols, Ingenieus
- Jules van Rooij, Rijksuniversiteit Groningen

DIT SECTORBEELD KWAM VERDER TOT STAND MET TEKST- EN/OF FOTOBIJDRAGES VAN

- Rob de Boer, Universiteit Utrecht
- Sander Elzerman/Bureau Stadsnatuur
- Ron Heeren, Universiteit Maastricht
- Edwin van Huis, Naturalis Biodiversity Center
- Roelof Hut, Rijksuniversiteit Groningen
- Lukas Kapitein, Universiteit Utrecht
- Marion Koopmans, Erasmus MC
- John van der Oost, Wageningen University
- Alexander van Oudenaarden, Hubrecht Institute
- Ronald Pierik, Universiteit Utrecht
- Jos Raaijmakers/NIOO-KNAW
- Pieter Roelfsema, Nederlands Herseninstituut
- Tessa Roseboom, Rijksuniversiteit Groningen
- Menno Schilthuizen, Naturalis Biodiversity Center
- Bas Teusink, Vrije Universiteit Amsterdam
- Klaas Timmermans, Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee
- Additionele foto's: iStock Photo

BIJLAGE 9. OVERZICHT VAN DEELNEMENDE UNIVERSITEITEN EN INSTITUTEN

UNIVERSITEITEN

- Radboud Universiteit (RU)
- Rijksuniversiteit Groningen (RUG)
- Universiteit Leiden (UL)
- Universiteit Maastricht (UM)
- Universiteit Utrecht (UU)
- Universiteit van Amsterdam (UvA)
- Vrije Universiteit Amsterdam (VUA)
- Wageningen University (WU)

INSTITUTEN

- Nederlands Instituut voor Ecologie (NIOO, KNAW)
- Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ, NWO-I)
- Naturalis Biodiversity Center
- Westerdijk Fungal Biodiversity Institute (WI, KNAW)
- Nederlands Herseninstituut (NIN, KNAW)
- Hubrecht Institute (KNAW)

BIJLAGE 10. INTERDISCIPLINAIRE OPLEIDINGEN PER UNIVERSITEIT

BACHELOROPLEIDINGEN

Rijksuniversiteit Groningen

Biomedische Technologie

Universiteit Leiden

Life Sciences and Technology

Universiteit Utrecht

Global Sustainability Science; Molecular and Biophysical Life Sciences; Molecular Life Sciences; Natuurwetenschap en Innovatiemanagement

Universiteit van Amsterdam

Bèta-Gamma; Future Planet Studies

Vrije Universiteit Amsterdam

Aarde, Economie en Duurzaamheid; Science, Business & Innovation

Wageningen University

Environmental Sciences; Food Technology; Biosystems Engineering; International Land and Water Management; Landscape Architecture and Planning; Soil, Water, Atmosphere

MASTEROPLEIDINGEN

Rijksuniversiteit Groningen

Biomedical Engineering; Medical Pharmaceutical Sciences

Universiteit Leiden

Industrial Ecology

Universiteit Maastricht

Health Food Innovation Management

Universiteit Utrecht

Earth, Life and Climate; Marine Sciences; Science and Business Management

Universiteit van Amsterdam

Brain and Cognition; Forensic Science

Vrije Universiteit Amsterdam

Global Environmental Change and Policy; Environment and Resource Management

Wageningen University

Communication, Health and Life Sciences; Climate Studies; Earth and Environment; Food Safety; Food Technology; Organic Agriculture

BIJLAGE 11. METHODIEK CITATIE-ANALYSE

Voor dit sectorbeeld is een citatie-analyse uitgevoerd van de biologie in Nederland. Doel was om de kwaliteit van de biologische publicaties in het algemeen en van de verschillende deelgebieden van de biologie vast te stellen. De biologie is daartoe opgedeeld in elf herkenbare deelgebieden, te weten:

- Moleculaire biologie, Genetica, -Omics & Biofysica
- Systeembioologie & Bioinformatica
- Theoretische & Computatieve Biologie
- Biotechnologie & Synthetische biologie
- Celbiologie & Ontwikkelingsbiologie
- Ecologie & Evolutiebiologie
- Fysiologie & Gedragsbiologie
- Neurobiologie
- Mariene & Zoetwaterbiologie
- Microbiologie & Virologie
- Planten- & Landbouwwetenschappen

Alle Nederlandse biologische publicaties in de periode 2014 t/m 2018 zijn automatisch geclassificeerd in bovenstaande deelgebieden. Vervolgens is per deelgebied* bepaald:

- Het aantal publicaties (P), een maat voor de productiviteit van het deelgebied.
- De field-weighted citation impact (fwci): hoe vaak een publicatie geciteerd wordt t.o.v. het wereldgemiddelde van het wetenschapsveld in het publicatiejaar van de publicatie. De gemiddelde fwci is wereldwijd 1. Deelgebieden met scores boven de 1 scoren dus bovengemiddeld. De fwci wordt beschouwd als een maat voor de kwaliteit van de deelgebieden.
- Welk percentage van de publicaties in de top 5 procent meest geciteerde publicaties van het wetenschapsveld terechtkwamen. Deelgebieden met scores boven de 5 procent scoren dus bovengemiddeld. Dit percentage wordt beschouwd als een maat voor de kwaliteit van de deelgebieden.

* *Bij uitzondering is bij de neurobiologie gebruik gemaakt van een uitgebreide database van publicaties om een representatief beeld van dit brede deelgebied te verkrijgen.*

Het volledige rapport van de citatie-analyse 2014-2018 is op te vragen bij biologie@uu.nl

BIJLAGE 12.

KENGETALLEN VAN HET BIOLOGIEONDERWIJS EN -ONDERZOEK

	2015	%V	2016	%V	2017	%V	2018	%V	2019	%V
Instream BSc	2883	60%	3251	61%	3604	62%	3661	65%	3671	64%
Totaal BSc	9205	57%	9539	58%	10183	59%	10732	60%	11170	60%
Instream MSc	2225	58%	2583	60%	2621	61%	2763	60%	2894	61%
Totaal MSc	5989	58%	6691	59%	6972	60%	7209	59%	7653	59%
WP vast (FTE)	473	23%	470	25%	498	26%	515	29%	542	30%
WP tijdelijk (FTE)	1129	49%	1175	49%	1217	52%	1254	51%	1307	51%

De studentaantallen betreffen de biologische opleidingen genoemd in bijlage 15. Bij het wetenschappelijk personeel met een vast of tijdelijk dienstverband zijn alle functieniveaus (hoogleraar, universitair (hoofd)docent, postdoc, promovendus en overig WP) in dienst van de biologische instituten van de universiteiten in bijlage 9 meegeteld. Voor een berekening van de student/staf-ratio op basis van deze gegevens zie figuur 18.

BIJLAGE 13.

SCORES ONDERZOEKSEVALUATIE NEDERLANDSE UNIVERSITEITEN EN INSTITUTEN

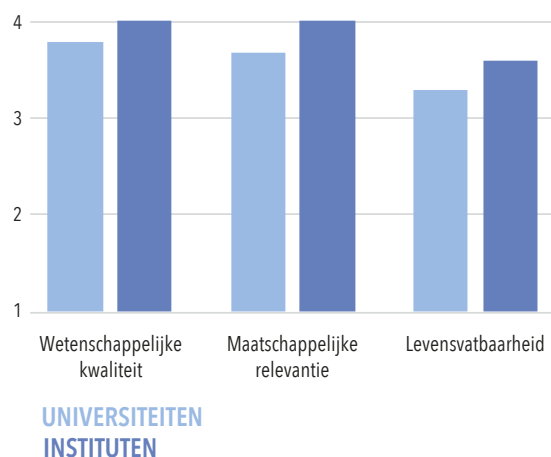
Alle onderzoekseenheden van universiteiten en NWO- en KNAW-instituten worden eens per zes jaar extern geëvalueerd. Deze evaluatie gebeurt volgens het SEP (Standaard Evaluatie Protocol), opgesteld door de VSNU, NWO en KNAW. Eenheden worden beoordeeld op drie criteria: (1) wetenschappelijke kwaliteit van het onderzoek en bijdrage aan wetenschappelijke kennis, (2) maatschappelijke relevantie, en (3) levensvatbaarheid; het vermogen om de wetenschappelijke en maatschappelijke ambities te realiseren. De criteria worden beoordeeld met een cijferscore:

4 = world leading, excellent

3 = very good

2 = good

1 = unsatisfactory.



In de grafiek is de gemiddelde onderzoeksscore van alle biologische eenheden van de bij dit sectorbeeld betrokken Nederlandse universiteiten en instituten (zie bijlage 9) te zien.

Bron: beoordelingsrapporten SEP-visitaties zoals gepubliceerd door de universiteiten en instituten.

**BIJLAGE 14.
OVERZICHT WINNAARS
NWO-SPINOZAPREMIE MET EEN
BIOLOGIE-ACHTERGROND**

2020 Sjaak Neeffes
2019 Yvette van Kooyk
2018 Anna Akhmanova, Marileen Dogterom,
John van der Oost
2017 Alexander van Oudenaarden
2015 Cisca Wijmenga
2014 Mark van Loosdrecht, Theunis Piersma
2012 Mike Jetten
2009 Marten Scheffer
2008 Willem de Vos
2007 Marcel Dicke
2006 Carl Figdor, Ben Scheres
2005 René Bernards, Peter Hagoort
2002 Els Goulmy
2001 Hans Clevers
1999 Ronald Plasterk
1998 Jan Hoeijmakers
1995 Frank Grosveld

**OVERZICHT WINNAARS NWO-
STEVINPREMIE/ SIMON STEVIN
MEESTER MET EEN BIOLOGIE-
ACHTERGROND**

2020 Ton Schumacher
2019 Jack Pronk
2018 Marion Koopmans
2013 Mark van Loosdrecht
2011 Oscar Kuipers
2008 Han Wösten

**HOOFDAANVRAGERS MET EEN
BIOLOGIE-ACHTERGROND DIE EEN NWO
ZWAARTEKRACHT- PREMIE HEBBEN
VERWORVEN**

2018-2019 Danielle Posthuma
Brainscapes: A Roadmap from
Neurogenetics to Neurobiology

Harro Bouwmeester
MiCRop: Harnessing the second genome of
plants. Microbial imprinting for crop
resilience

Roel Vermeulen
Exposome-NL

2017 Carlijn Bouten
Materials-driven regeneration: Regenera-
ting tissue and organ function with intelli-
gent, life-like materials

Marileen Dogterom
BaSyC: Building a Synthetic Cell

2013 Mike Jetten
The Soehngen Institute for anaerobic
microbiology: microben voor gezondheid
en milieu

2012 René Bernards
Kankerbehandeling op maat

BIJLAGE 15. OVERZICHT BIOLOGISCHE BACHELOR- EN MASTEROPLEIDINGEN IN NEDERLAND

De aan dit sectorbeeld verbonden universiteiten bieden de volgende biologie- en sterk biologie-gerelateerde opleidingen aan:

BACHELOROPLEIDINGEN

Radboud Universiteit

Biologie, Molecular Life Sciences, Science, Biomedische Wetenschappen

Rijksuniversiteit Groningen

Biologie, Life Science and Technology

Universiteit Leiden

Biologie, Bioinformatica, Biomedische Wetenschappen

Universiteit Maastricht

Maastricht Science Programme, Biomedical Sciences

Universiteit Utrecht

Biologie, Biomedische Wetenschappen

Universiteit van Amsterdam

Biologie, Biomedische Wetenschappen, Psychobiologie

Vrije Universiteit Amsterdam

Biologie, Biomedical Sciences, Gezondheid & Leven,
Gezondheidswetenschappen

Wageningen University

Animal Sciences, Biology, Bos- en Natuurbeheer, Biotechnology, Moleculaire
Levenswetenschappen, Plantenwetenschappen, Voeding en Gezondheid

MASTEROPLEIDINGEN

Radboud Universiteit

Biology, Medical Biology, Molecular Life Sciences, Science, Cognitive
Neuroscience, Biomedical Sciences, Molecular Mechanisms of Disease

Rijksuniversiteit Groningen

Biology, Marine Biology, Ecology and Evolution, Biomolecular Sciences,
Biomedical Sciences, Behavioral and Cognitive Neuroscience, Educatie en
Communicatie in de Bètawetenschappen

Universiteit Leiden

Biology, Bioinformatics, Biomedical Sciences

Universiteit Maastricht

Systems Biology, Biomedical Sciences, Neurosciences

Universiteit Utrecht

Biosciences, Biomedical Sciences, Science Education and Communication

Universiteit van Amsterdam

Biological Sciences, Biomedical Sciences

Vrije Universiteit Amsterdam

Biomedical Sciences, Biomolecular Science, Ecology, Bio-informatics and
Systems Biology, Neurosciences

Wageningen University

Aquaculture and Marine Resource Management, Animal Sciences, Bioinformatics,
Biology, Biobased Sciences, Biotechnology, Forest and Nature Conservation,
Nutrition and Health, Plant Biotechnology, Plant Sciences

SECTORBEELD 2020



OP WEG NAAR EEN GEZONDE TOEKOMST

BEELD VAN
DE NEDERLANDSE
FARMACEUTISCHE
WETENSCHAPPEN



INHOUD

TEN GELEIDE	137
INTRODUCTIE	139
FARMACEUTISCHE WETENSCHAPPEN IN NEDERLAND: BIJDRAGEN AAN MAATSCHAPPELIJKE THEMA'S EN MISSIES	141
BELEIDSTHEMA'S	141
CONCRETE MISSIES	143
ONDERZOEKSVRAAGSTUKKEN VAN DE FARMACEUTISCHE WETENSCHAPPEN	145
ONDERZOEKSVRAAGSTUKKEN	145
VERSTERKING VAN DE FARMACEUTISCHE WETENSCHAPPEN: INVESTEREN IN DE TOEKOMST	149
SECTOR FARMACEUTISCHE WETENSCHAPPEN	149
ONDERZOEK	149
ONDERWIJS	151
BENODIGDE STEUN	153
CONCLUSIE	155
ORGANISATIE DISCIPLINE EN VERVOLGSTAPPEN TEN BEHOEVE VAN SECTORPLAN	155
BIJLAGE	156



TEN GELEIDE

De Farmaceutische Wetenschappen zijn een multidisciplinair wetenschapsgebied waarbij de fundamentele bètawetenschappen worden ingezet voor ontdekking, ontwikkeling en gebruik van geneesmiddelen. Kenmerkend is de volledige integratie van de verschillende wetenschapsgebieden gericht op het geneesmiddelenonderzoek.

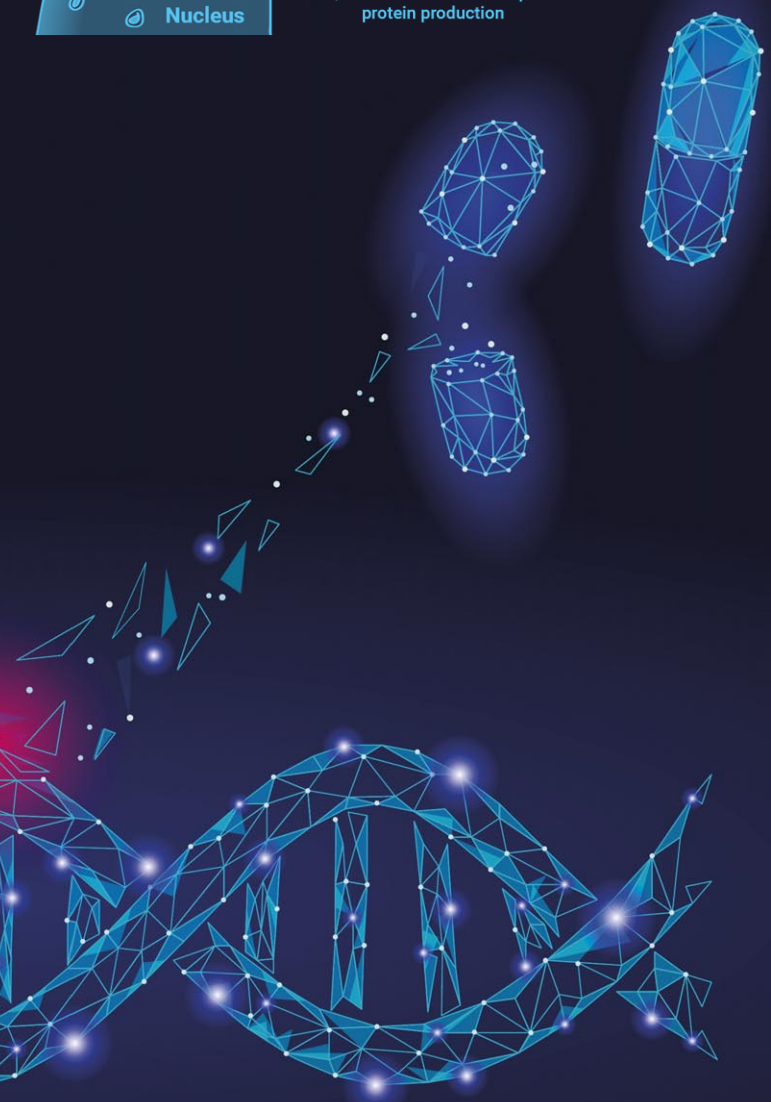
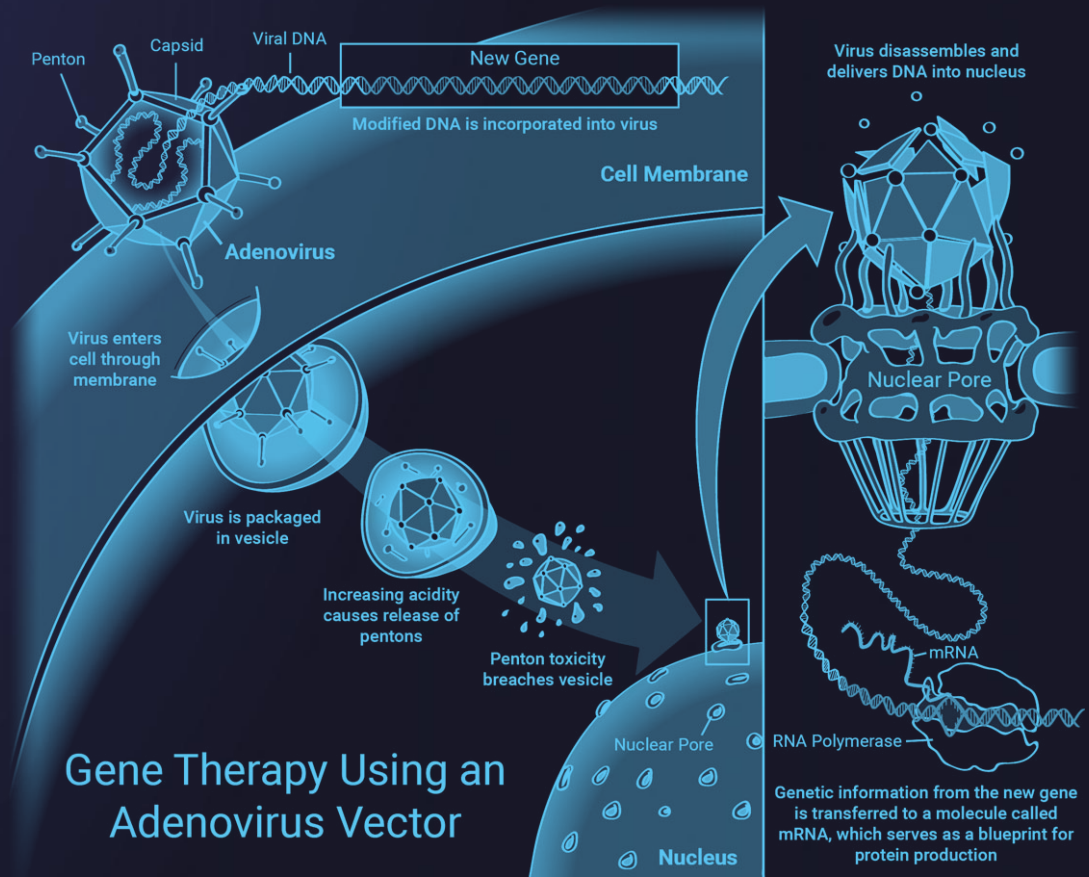
In Nederland vallen de opleidingen Farmacie en Bio-Farmaceutische wetenschappen in Groningen, Leiden en Utrecht onder de bètafaculteiten waar apothekers en onderzoekers worden opgeleid. In alle betrokken instituten wordt gewerkt aan nieuwe concepten voor de ontdekking en optimalisatie van geneesmiddelen, zowel voor kleine synthetische moleculen als biologische geneesmiddelen en celtherapieën. In dit sectorbeeld worden de Farmaceutische Wetenschappen gedefinieerd en afgebakend, de huidige stand van deze sector in Nederland beschreven, de wetenschappelijke ontwikkelingen en uitdagingen uiteengezet en de nationale ambities geformuleerd. Het sectorbeeld vormt de basis voor de verdere uitwerking van een integraal bètasectorplan, waarin het implementatieplan en de toegevoegde waarde van de investeringen in Farmaceutische Wetenschappen voor wetenschap en maatschappij verder worden uitgewerkt, en waarmee de kern van de discipline geborgd kan worden.

Dit sectorbeeld is tot stand gekomen door de taskforce Farmaceutische Wetenschappen, bestaande uit farmaceutische wetenschappers van de RUG, de UL en de UU, in nauwe samenwerking met en ondersteuning van NWO, en met feedback van de bètadecanen, maatschappelijke stakeholders met een belang bij de opleiding, zoals bedrijven, medische centra, overheidsinstellingen en patiëntvertegenwoordigers (zie bijlage 16). In het opstellen van dit sectorbeeld is opgetrokken met Biologie, Aard- en Milieuwetenschappen en Astronomie, en wordt ook de urgentie van deze disciplines voor maatschappelijke en wetenschappelijke vraagstukken in kaart gebracht. Het onderzoek en onderwijs binnen deze sectoren levert kennis en kunde op om grote uitdagingen op thema's als gezondheid, veiligheid, voedsel(keten), energie(transitie), klimaat, water, milieu en duurzaamheid op te kunnen lossen.

Samenwerking binnen de genoemde sectoren maar ook met aanpalende disciplines van de levenswetenschappen, waaronder Scheikunde, Geneeskunde en Informatica, biedt vele nieuwe mogelijkheden om voorop te blijven lopen bij het in hoog tempo veranderende proces van geneesmiddelontwikkeling en -gebruik waar kwaliteit, effectiviteit en veiligheid van producten vereisten zijn. We vertrouwen erop de lezer van dit beeld hiervan te kunnen overtuigen.



Namens de taskforce,
Roos Masereeuw



INTRODUCTIE

Voor dit sectorbeeld van de Farmaceutische Wetenschappen is in 2019 al een eerste schets geleverd in 'Een nieuw fundament: beeld van de bètasector'. Deze in Nederland relatief jonge wetenschappelijke sector heeft in korte tijd een cruciale en volwaardige positie ingenomen in het bètawetenschappelijke landschap en speelt internationaal op vele gebieden een toonaangevende rol. De Farmaceutische Wetenschappen dragen essentiële kennis bij aan het oplossen van belangrijke maatschappelijke vraagstukken, in het bijzonder op het gebied van de gezondheid en de zorg. De sector is in grote mate verantwoordelijk voor de enorme groei in innovatieve biotechnologische bedrijven en daarmee van de Nederlandse Bioscience parken, met een grote vraag naar goed gekwalificeerd personeel en hoogwaardige kennis. Dit thema is uitermate belangrijk voor de Nederlandse overheid en samenleving met het oog op het behouden en verduurzamen van onze welvaart en gezondheid, zoals bijvoorbeeld uit de COVID-19-pandemie blijkt.

De sector Farmaceutische Wetenschappen voert hiervoor niet alleen hoogwaardig en vooruitstrevend onderzoek uit, maar leidt ook farmaceutische deskundigen op die in diverse geledingen van onze samenleving en arbeidsmarkt essentiële rollen kunnen en moeten vervullen. In dit sectorbeeld zal daarom worden aangegeven aan welke beleidsthema's de Farmaceutische Wetenschappen een bijdrage leveren en welke concrete maatschappelijke problemen deze sector mede kan helpen oplossen.

Het onderzoek in de Farmaceutische Wetenschappen is van hoge kwaliteit. De Nederlandse Farmaceutische Wetenschappen bevinden zich in de wereldtop; alle drie de instituten staan in de top 50 van de ARWU ranking Pharmaceutical Sciences 2019 en twaalf farmaceutische wetenschappers bevinden zich tussen de 175 Nederlandse wetenschappers in de Highly Cited Researchers 2019 van Clarivate. Maar de urgentie van de vraagstukken die op ons afkomen neemt met rasse schreden toe, en daarmee ook de noodzaak om gebruik te kunnen blijven maken van de allernieuwste fundamentele wetenschappelijke doorbraken en *state-of-the-art* faciliteiten, artificiële intelligentie en geavanceerde biotechnologische benaderingen.

In dit sectorbeeld zal daarom ook worden onderbouwd dat deze urgentie vraagt om versnelling van de verdere opbouw en uitbouw van – de capaciteit voor – het fundamentele wetenschappelijke onderzoek en een vernieuwingsslag in het academische onderwijs. Maar niet alleen de maatschappelijke behoefte vraagt om versterking. Ook bijvoorbeeld de verhouding tussen het aantal studenten en stafleden oefent grote (toenemende) druk uit op zowel onderwijs als onderzoek. De noodzakelijke versnelling kan dan ook niet gerealiseerd worden zonder extra investeringen in de capaciteit van het onderzoek en onderwijs in de Farmaceutische Wetenschappen.

Investeringen in de kern van de discipline zijn op dit moment niet geborgd en dienen derhalve te worden afgedekt met een eigen sectorplan. Een plan voor de Farmaceutische Wetenschappen zal vanwege het systeemdenken en de aard van de activiteiten synergistisch zijn met sectorplannen voor Biologie en Aard- en Milieuwetenschappen, alsmede met de investeringen die onlangs bij Scheikunde, Informatica en Meettechnologie hebben plaatsgevonden.



OPLOSSINGEN VOOR VEILIGE PRODUCTIE VAN GENEESMIDDELEN HARD NODIG

In 2018 zijn nitrosamines aangetroffen in een aantal bloeddrukverlagende medicijnen die bekend staan als de 'sartanen', waaronder valsartan. Nitrosamines zijn geclassificeerd als waarschijnlijk kankerverwekkend. Dit heeft geleid tot terugroepacties van verschillende producten in Nederland en Europa, en een Europees onderzoek. Dit onderzoek wees uit dat een goedkoper productieproces, dat werd gebruikt voor generieke preparaten, nitrosamine-verontreinigingen met zich mee brengt. De European Medicines Agency (EMA) heeft inmiddels strikte nieuwe productie-eisen voor deze geneesmiddelen gesteld.²⁹

²⁹ <https://www.igj.nl/onderwerpen/verontreiniging-van-geneesmiddelen-met-nitrosamine/nieuws/2018/12/19/update-terugroepactie-aantal-bloeddrukmedicijnen-met-valsartan>

FARMACEUTISCHE WETENSCHAPPEN IN NEDERLAND: BIJDRAGEN AAN MAATSCHAPPELIJKE THEMA'S EN MISSIES

Nederland staat voor een aantal grote uitdagingen en staat daarin niet alleen want veel van die uitdagingen delen we met andere delen van de wereld, zoals bijvoorbeeld de vergrijzing van de bevolking, een toename van chronische aandoeningen en de noodzaak van een gepersonaliseerde geneesmiddeltherapie voor een toenemend aantal ziekten. Dit vraagt om innovaties in beter voorspellende modellen en versnelde ontwikkeltrajecten voor nieuwe geneesmiddelen. Tevens zijn betere en duurzamere productiemethoden van groot belang voor Nederland en Europa. Vanuit haar intrinsieke kerntaak kunnen de Farmaceutische Wetenschappen een bijdrage leveren aan oplossingen voor de bedreiging van de gezondheid en de welvaart van ons land en onze bevolking. Het aanpakken van deze uitdagingen vraagt ook om duurzame oplossingen, zodat de toekomstige generaties gezond en welvarend zullen blijven. In dit hoofdstuk zullen daarom eerst, vanuit het perspectief van de Farmaceutische Wetenschappen, de belangrijkste uitdagingen, beleidsthema's en maatschappelijke missies aan de orde gesteld worden.

BELEIDSTHEMA'S

Zoals de COVID-19 crisis schrijnend aan het licht brengt is – en blijft – onze samenleving kwetsbaar als het gaat om onze gezondheid. De hieruit voortvloeiende economische problematiek toont aan dat, in onze uiterst complexe nationale en internationale samenlevingen, gezondheid niet op zichzelf staat. Het is dan ook niet voor niets dat het thema 'Gezondheid' hoog op de diverse maatschappelijke en beleidsagenda's staat. Welvaart en welzijn ervaren wij als belangrijke verworvenheden van onze maatschappij. Ze zijn sterk met elkaar verbonden. Gezondheid, ziekte, zorg, veroudering, fysieke en mentale gesteldheid, leefomgeving, milieu, etc., zijn allemaal onderwerpen die niet alleen met elkaar verbonden zijn maar die ook cruciaal zijn voor een gezonde, vrije en duurzame samenleving.

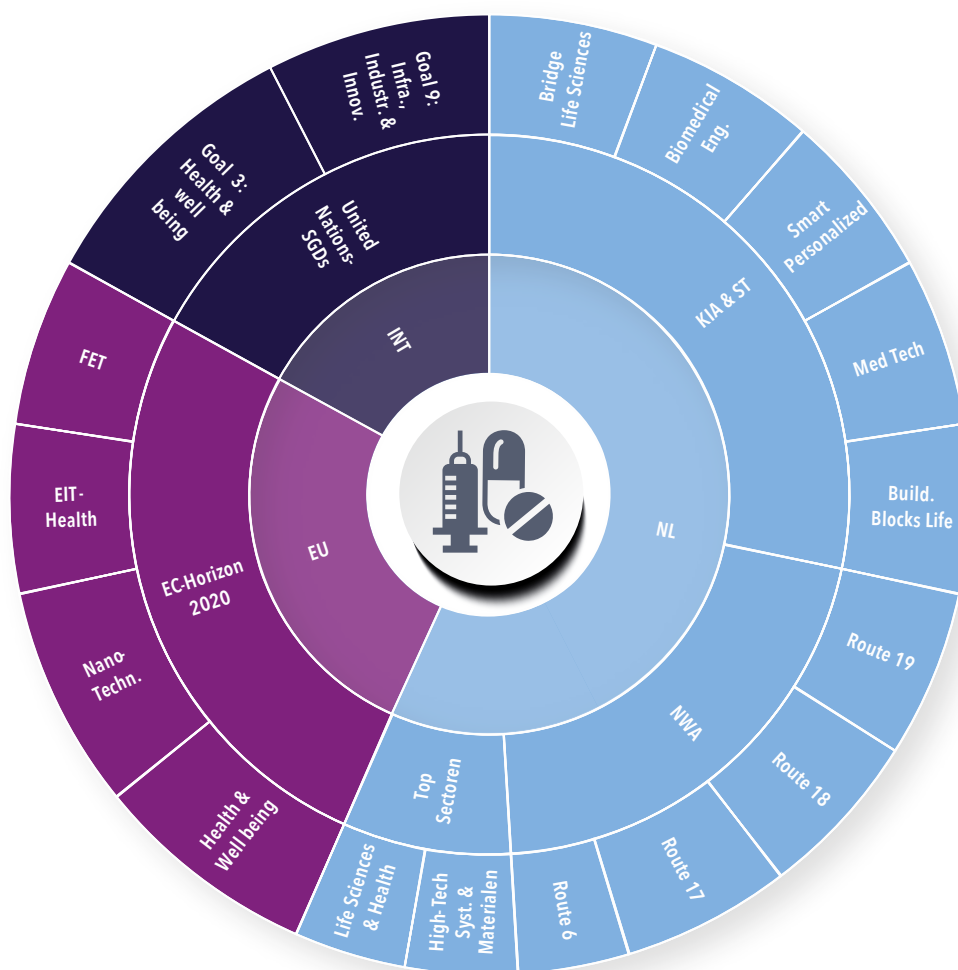
Op het gebied van de gezondheid en de zorg liggen grote maatschappelijke uitdagingen, die om creatieve oplossingen en innovaties vragen, oplossingen waar ook de Farmaceutische Wetenschappen in een belangrijke mate aan kunnen bijdragen. Dit is een van de vier hoofdthema's van het nieuwe 'missiegedreven innovatiebeleid', een door het ministerie van EZK geïnitieerd beleidskader van onze overheid³⁰. Aanpalend hieraan komt het thema gezondheid op diverse manieren terug in de KIA Sleuteltechnologieën³¹, zoals samengevat in Figuur 20. Daarnaast stimuleert de Topsector Life Sciences & Health (LSH) innovatie middels Health-Holland³² de (internationale) positie van de Nederlandse LSH-sector om de maatschappelijke uitdagingen rondom preventie, zorg en welzijn aan te gaan. De Farmaceutische Wetenschappen kunnen sterk bijdragen aan deze missie door de kwaliteit van het leven te verbeteren (vitaliteit) en de kosten van de gezondheidszorg te beperken, onder meer door de verkorting van het ontwikkelingstraject voor geneesmiddelen te realiseren. Het belang hiervan is ook door de COVID-19 crisis aangetoond.

30 Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (2019). Kamerbrief over Voortgang nationaal actieprogramma 'Nieuwe kansen voor topsector Life Sciences & Health'

31 Kennis- en Innovatieagenda Sleuteltechnologieën 2020-2023 (2019)

32 <https://www.health-holland.com/international-visitors/facts-figures>

FIGUUR 20: DE BIJDRAGE VAN DE FARMACEUTISCHE WETENSCHAPPEN AAN VERSCHILLENDE BELEIDSTHEMA'S ZOWEL OP NATIONAAL (NL), EUROPEES (EU) ALS INTERNATIONAAL (INT) NIVEAU



KIA & ST = Kennis en Innovatie Agenda en Sleutel Technologieën. Meerjarenprogramma's (MJPs): MJP 2-Building Blocks of Life, MJP-13 Smart personalized food & medicine, MJP 14- Maatschappelijk gewenste en veilige biotechnologische toepassingen, door middel van Safe-by-Design, MJP 16-MedTech verbetert uitkomsten voor patiënten en verlicht inzet van zorgpersoneel, MJP 17-Biomedical Engineering for Health, MJP 86-BRIDGE: Het overbruggen van gaten voor snellere en betere ontwikkeling nieuwe behandelingen.

NWA = Nationale Wetenschapsagenda, Route 19-Regeneratieve geneeskunde: gamechanger op weg naar brede toepassing, Route 18-De quantum / nano-revolutie, Route 17-Personalised medicine: uitgaan van het individu, Route 6- Gezondheidszorgonderzoek, preventie en behandeling.

Topsectoren, Life Sciences & Health (LSH), High Tech Systemen en Materialen.

EC-Horizon 2020 = European Commission Horizon 2020 program, Societal challenges: Health demographics & well-being, Industrial leadership - Nanotechnology; FET= Future and Emerging Technologies, FTE-Neuro-technologies and FTE-Quantum Flagship; EIT=Enabling and Industrial Technologies, EIT- Nanotechnologies.

UN-SDGs = United Nations-Sustainable Development Goals, SDG3- Good health & well-being, SGD 9- Industry Innovation and Infrastructure.

Onze maatschappij vraagt ook om duurzame oplossingen voor de productie van effectievere en veiligere geneesmiddelen, zoals de valsartan casus heeft laten zien (zie details op p.140) en de antibioticaresistentie in mens, dier én milieu die wereldwijd pandemische vormen aanneemt. Tevens biedt de komst van de European Medicines Agency (EMA) naar Nederland extra kansen voor diverse farmaceutische expertise velden om onderscheidend te kunnen zijn.

Het belang van het thema gezondheid en zorg wordt ook onderstreept door de aandacht die het heeft in de Nationale Wetenschapsagenda, een van de wetenschappelijke beleidskaders van het ministerie van OCW. Verder neemt de laatste jaren de ethische en maatschappelijke zorg om het welzijn van proefdieren in wetenschappelijk onderzoek toe. Het politieke traject 'Transitie Proefdiervrije Innovatie' is op initiatief van het ministerie van LNV gestart met als doel zonder proefdieren effectiever onderzoek te doen naar nieuwe geneesmiddelen door te investeren in innovatieve humane testmodellen. Dit thema staat ook hoog op de agenda van diverse European Commission Horizon 2020 programma's. Daarnaast kent het Horizon 2020 Future and Emerging Technologies (FET) programma verschillende *Flagships* waar gezondheid en biotechnologische innovatie als thema's ondergebracht zijn en waar de Farmaceutische Wetenschappen een wezenlijke bijdrage aan kunnen leveren om Europa wereldwijd een stevige concurrentiepositie te geven (Figuur 20).

CONCRETE MISSIES

Het is evident dat de in de vorige paragraaf genoemde beleidsthema's voor eenieder in onze samenleving relevant zijn. Binnen die thema's zijn er echter specifieke en concrete opgaves en vraagstukken te identificeren die als eerste de aandacht verdienen ('missies'). In deze paragraaf zullen enkele van de maatschappelijke missies benoemd worden die relevant zijn voor de Farmaceutische Wetenschappen in Nederland. De hier genoemde missies zijn daarom opgesteld en geformuleerd door de sector zelf, waardoor de bijdrage die de sector met haar onderzoek kan leveren helder naar voren komt. Positionering van de Farmaceutische Wetenschappen als sterke fundamentele discipline is essentieel om de internationale concurrentiepositie van Nederland op dit gebied te versterken en de eerdergenoemde maatschappelijke vraagstukken te kunnen oplossen. De noodzaak en wens om vanuit Nederland bij te dragen aan de oplossing van landelijke, Europese en wereldvraagstukken en waar mogelijk zelfvoorzienend te kunnen zijn, vraagt om een brede sector waarin alle essentiële aspecten en kennis betreffende de R&D, productie en het gebruik van geneesmiddelen aanwezig is. Hiertoe hebben we de volgende concrete missies gedefinieerd:

- Bevorderen van de **fundamentele farmaceutische** kennis teneinde de **veilige werking van een geneesmiddel** in het complexe biologische systeem van een patiënt te waarborgen,
- Implementatie van de nieuwste computationele technieken waaronder *Artificial Intelligence* (AI) en systeemfarmacologie in de Farmaceutische Wetenschappen met het doel de ontwikkeltijd van **nieuwe, effectievere** en veiligere medicijnen verkorten,
- De ontwikkeling van **beter voorspellende modelsystemen** zoals op basis van *organ-on-chip* en computermodellen voor humane ziekten om een aanzienlijk **versnelde ontwikkeling** van geneesmiddelen én een zeer gewenste **vermindering** van het gebruik van **proefdieren** te realiseren,
- De **kwaliteit** van patiënt-eigen (autologe) **celtherapie** en andere zogenaamde **advanced therapy medicinal products (ATMPs)** beter borgen door het verhogen van fundamentele kennis hieromtrent,
- Voorheen onmogelijk geachte therapieën met behulp van **nanomedicine** in de **delivery** van geneesmiddelen te kunnen ontwikkelen.



ONDERZOEKSVRAAGSTUKKEN VAN DE FARMACEUTISCHE WETENSCHAPPEN

Om de essentiële bijdragen aan de concrete maatschappelijke missies, zoals genoemd in het vorige hoofdstuk, te kunnen leveren, richt de sector Farmaceutische Wetenschappen zich specifiek op een aantal concrete onderzoeksvraagstukken die in dit hoofdstuk aan de orde zullen komen. Dit hoofdstuk kan dan ook gezien worden als de onderzoekagenda van de Farmaceutische Wetenschappen voor de komende jaren, gericht op de beleidsthema's en maatschappelijke missies die voor Nederland het meest relevant zijn. Het onderwijs in de sector zal in deze vernieuwing en versterking meegaan om te waarborgen dat de samenleving en de stakeholders de gewenste afgestudeerden kan verwachten.

ONDERZOEKSVRAAGSTUKKEN

Het geneesmiddel is een technologisch product dat vele vormen kent, van kleine, synthetische moleculen en *nanomedicine* tot complexe biologische producten (zoals biomacromoleculen, cellen, vaccins). De snelheid waarmee digitale technologieën hun intrede hebben gedaan en de beschikbaarheid van grote data sets van preklinische en klinische gegevens, veranderen het proces van geneesmiddelontwikkeling in hoog tempo en bieden vele nieuwe mogelijkheden. Ook hebben vooruitstrevende biotechnologische ontwikkelingen in de afgelopen decennia ertoe geleid dat er meer en andere typen geneesmiddelen zijn bijgekomen (Tabel 3). Waar, van oudsher, de chemie de basis legde voor geneesmiddelen bestaande uit kleine moleculen die voor volksziekten bestemd waren (*one size fits all*), zoals hart- en vaatziekten, diabetes en astma, komen er nu nieuwe vormen zoals immuuntherapie, celtherapie en genterapeutische strategieën beschikbaar. Deze nieuwe therapieën zijn veelal gericht op de individuele patiënt en hieronder vallen ook de Advanced Therapy Medicinal Products (ATMPs).

Deze innovaties roepen veel nieuwe onderzoeksvraagstukken op³³. Want, hoe bewaak je de **kwaliteit** van bijvoorbeeld autologe (eigen) celtherapie? En hoe garandeer je de **veiligheid** van geneesmiddelgebruik in het complexe systeem dat een patiënt is, bijvoorbeeld in de transitie naar proefdiervrije beoordeling van geneesmiddelen? En ten slotte, hoe meet je de **effectiviteit** in n-is-1 onderzoek?

Nederland loopt vooraan op het terrein van genterapie met de eerste goedgekeurde genterapie voor de erfelijke stofwisselingsziekte lipoproteïnelypase-deficiëntie (LPL-deficiëntie; Glybera® (2012)) en de tweede goedgekeurde CAR-T-celtherapie tegen lymfeklierkanker, Yescarta® (2019). Met name de Nederlandse biofarmaceutische industrie, in ons land vooral in de vorm van MKB's, draagt sterk bij aan het innovatieve vermogen van Nederland op het gebied van nieuwe geneesmiddelen. Structurele ondersteuning door goede investeringen in opleidingen en de onderzoeksector moeten dit proces verder stimuleren. De aansluiting met de maatschappij/arbeidsmarkt mag hierbij niet uit het oog verloren worden.

33 Mullard (2020) N-of-1 drugs push biopharma frontiers. Nat Rev Drug Discov. 19(3):151-153

TABEL 3. THERAPEUTISCHE MODALITEITEN.

Modality	Cause of disease at the protein level		Molecular target			Protein target localization			Delivery		
	Reduction or loss of function	Excessive or detrimental function	DNA	RNA	Protein	Extracellular	Plasma membrane	Intracellular	Oral	Injection	Inhaled
Small molecule	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Protein replacement	●				●	●		●		●	●
Antibody		●			●	●	●			●	
Oligonucleotide therapy	●	●		●		●	●	●		●	●
Cell and gene therapy*	●		●			●	●	●		●	
Vaccine		●			●	●	●		●	●	●

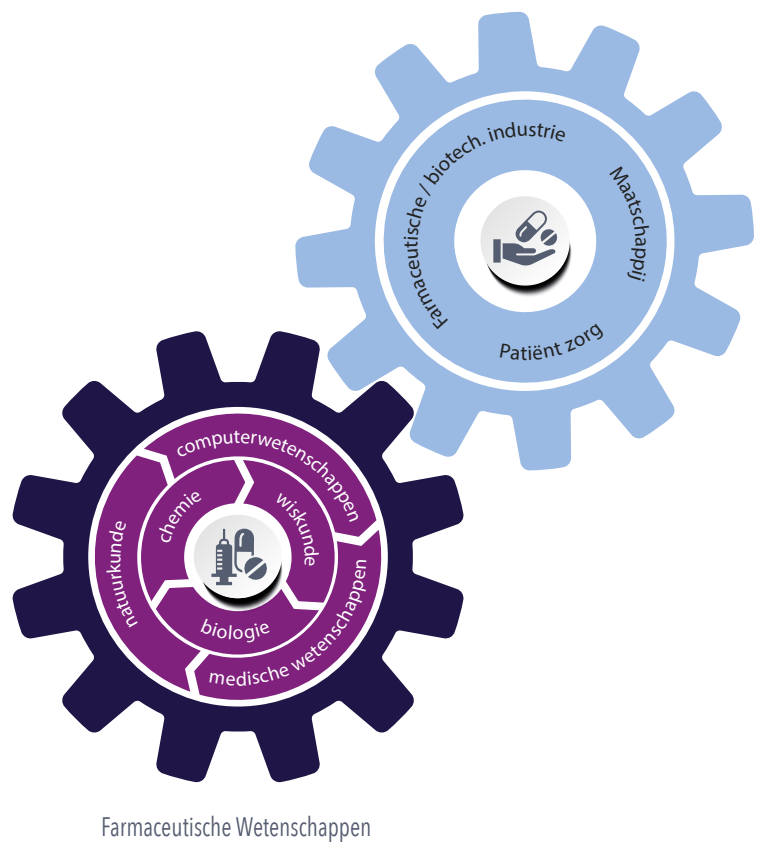
Aangepast uit Tambuyzer et al., 2019³⁴

FIGUUR 21: DE FARMACEUTISCHE WETENSCHAPPEN ALS MULTIDISCIPLINAIRE BETA-DISCIPLINE

De Farmaceutische Wetenschappen zijn een zelfstandige bètadiscipline die multidisciplinaire fundamentele kennis van de bètadisciplines biologie, chemie, natuurkunde, wiskunde en computerwetenschappen met de medische wetenschappen verbindt met als doel het ontwerp en de ontwikkeling van nieuwe, veilige en effectieve geneesmiddelen.

Nieuwe therapeutische modaliteiten en technologische ontwikkelingen leiden tot snelle verschuivingen in de discipline die versterking van het multidisciplinaire fundament op het gebied van biologie en AI/data science noodzakelijk maken. Gecombineerd met de grote behoefte vanuit de maatschappij aan multidisciplinaire farmaceutische professionals, vraagt dit om investeringen t.b.v. versterking van het fundamenteel, bètatechnisch-farmaceutisch domein.

Farmaceutische Professionals



34 Tambuyzer et al. (2019) Therapies for rare diseases: therapeutic modalities, progress and challenges ahead. Nat Rev Drug Discov. 19(2):93-111

De komst van de EMA naar Nederland biedt extra kansen voor diverse farmaceutische expertise velden, zoals het registratieproces dat de afgelopen jaren sterk ter discussie is komen te staan en dat behoefte heeft aan nieuwe geavanceerde methodieken om de toekomstige generatie geneesmiddelen naar de markt te kunnen begeleiden. Het is duidelijk geworden dat vernieuwing op basis van breed inzetbare platform-technologieën in het onderzoek en de ontwikkeling van nieuwe geneesmiddelen een urgente noodzaak zijn. Voor de Nederlandse universiteiten liggen er op basis van de breedte en de hoogwaardige kwaliteit van het onderzoek grote kansen om hier een bepalende rol in te spelen. Investing in de sector Farmaceutische Wetenschappen betekent ook investering in de ontwikkeling van eerdergenoemde sleuteltechnologieën, zoals ook gedefinieerd in de Kennis en Innovatieagenda (2019) en daarmee een bijdrage aan het welzijn en de welvaart van de Nederlanders.

Fundamentele, multidisciplinaire bètakennis over het ontwerp, de formulering, de analyse en de productie van geneesmiddelen gekoppeld aan kennis over ziektes en geneesmiddelgebruik garandeert dat de **kwaliteit**, **veiligheid** en **effectiviteit** geborgd zijn. Het wetenschappelijk veld is echter in een hoog tempo sterk aan het veranderen; technologische ontwikkelingen leiden tot nieuwe soorten geneesmiddelen, andere analysemethoden voor het bepalen van ziekteactiviteit en geneesmiddel-effectiviteit en fundamenteel andere productiemethoden. Ook neemt de maatschappelijke behoefte aan hooggekwalificeerde farmaceutische experts toe. Het is daarom noodzakelijk dat het wetenschappelijk onderzoek in Nederland mee verandert (Figuur 21).

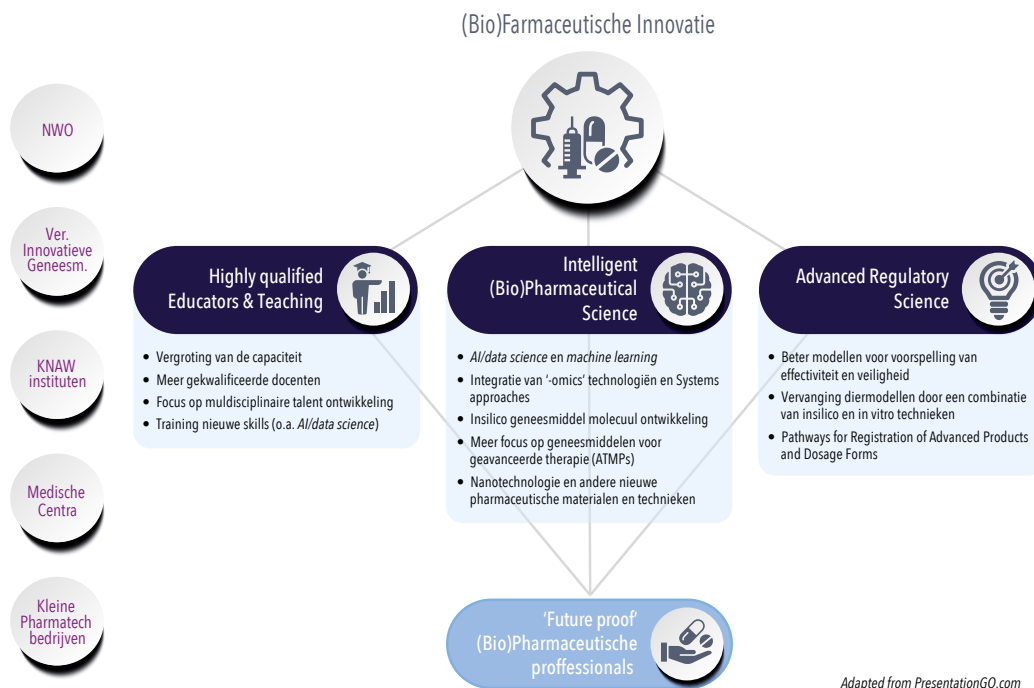
De snelle ontwikkelingen in de Farmaceutische Wetenschappen leiden tot een verschuiving van het fundament van de discipline en vragen om verdere kennisinnovatie. Het ontwikkelen van *systems-based* aanpak toegepast in de systeembioïologie en systeemfarmacologie met betrekking tot de wisselwerking tussen geneesmiddelen en ziektes is van belang om actuele uitdagingen in geneesmiddelontwikkeling en *personalized medicine* te realiseren.³⁵ Systeembioïologie en systeemfarmacologie gebruiken wiskundige modellen om inzicht te verkrijgen in de complexe werking van geneesmiddelen in het lichaam en AI-technieken worden toegepast op de toenemende hoeveelheden *big data* verzameld met omics-technieken of in de klinische praktijk om goede en veilige keuzes voor behandeling te kunnen maken. Farmaceutische professionals die met kennis van het geneesmiddel en de patiënt nieuwe algoritmes kunnen bouwen en de logica van de uitkomsten van AI en *big data* analyses kunnen begrijpen en uitleggen zijn hiervoor cruciaal. Deze innovaties kunnen leiden tot gerichtere trials en uiteindelijk tot snellere ontwikkeling van veilige geneesmiddelen en kostenbeheersing. Hierbij is ook een goede interactie met de regelgevers van essentieel belang.³⁶ Verder wil de maatschappij het testen in proefdieren reduceren of (indien mogelijk) zelfs geheel verlaten. Ter vervanging moeten geavanceerde nieuwe, en beter voorspellende modellen en technologieën komen zoals op stamcel-gebaseerde *organ-on-chip* modellen of computermodellen om efficiënt het effect van geneesmiddelen op ziektes te kunnen voorspellen en te vertalen naar de mens. Voor de Farmaceutische Wetenschappen betekent dit dat er naast de oorspronkelijk chemische *skill set* nu ook een biologische, technologische en *data science skill set* nodig zijn. De integratie van deze *skill sets* rondom het geneesmiddel moet de basis gaan vormen voor de nieuwe generatie farmaceutische professionals (Figuur 22). Dit **vraagt om versterking van het state-of-the-art fundamenteel, bètatechnisch-farmaceutische onderzoek** om vernieuwing van de (bio)farmaceutische sector mogelijk maken. Het aanhaken bij al deze innovaties kan in onvoldoende mate worden bekostigd uit de huidige basisfinanciering en vergt daarom investeringen.

35 Yurkovich et al. (2019) A systems approach to clinical oncology uses deep phenotyping to deliver personalized care. *Nat Rev Clin Oncol*. 17(3):183-194

36 Woodcock and Marks (2019) Drug Regulation in the Era of Individualized Therapies. *N Engl J Med*. 381(17):1678-1680

FIGUUR 22: DE VRAAG VANUIT DE MAATSCHAPPIJ OM EEN NIEUWE GENERATIE FARMACEUTISCHE PROFESSIONALS IS HOOG

Hiervoor is innovatie van het farmaceutische onderzoek nodig ter versteviging van *AI/data science* en machine learning, *in silico* geneesmiddelontwikkeling en integratie van 'omics' technologieën, naast de ontwikkeling van nieuwe, op de biologie-gebaseerde, therapieën waarbij gebruik wordt gemaakt van betere, voorspellende modellen van effectiviteit en veiligheid van geneesmiddelen.



Veel technologie is verplaatst naar landen met lage lonen en minder complexe regelgeving, maar dat zou voor een deel terug naar Europa en zelfs Nederland gehaald moeten worden, zoals de COVID-19 crisis en de valsartan casus (zie p. 140 'Oplossingen voor veilige productie van geneesmiddelen hard nodig') nog eens prangend laten zien. Hiervoor is een infrastructuur nodig die ons wereldwijd weer aan tafel zet met de belangrijkste spelers in het farmaceutische veld. In een recente brief van staatssecretaris Keijzer aan de Tweede Kamer (Ministerie EZK 2019) wordt ook onderschreven dat het onvoldoende lukt om farmaceutische bedrijven naar Nederland te halen, in het kielzog van de EMA, vanwege onder meer een gebrek aan onderzoeksfaciliteiten en aan (bio-)farmaceutische professionals.

VERSTERKING VAN DE FARMACEUTISCHE WETENSCHAPPEN: INVESTEREN IN DE TOEKOMST

De sector Farmaceutische Wetenschappen is uitstekend gepositioneerd om de onderzoeksvraagstukken uit het vorige hoofdstuk op te pakken. Daarmee kan deze sector een belangrijke bijdrage leveren aan het oplossen van de maatschappelijke missies (Hoofdstuk: Onderzoeksvraagstukken van de Farmaceutische Wetenschappen). In dit hoofdstuk zal het profiel van de sector Farmaceutische Wetenschappen geschetst worden en zal worden aangegeven op welke manier de extra investeringen zullen leiden tot een versnelling van het noodzakelijke fundamentele onderzoek en de vernieuwing van het onderwijs, waarmee tegemoetgekomen wordt aan de behoeftes van samenleving en arbeidsmarkt.

SECTOR FARMACEUTISCHE WETENSCHAPPEN

De Farmaceutische Wetenschappen zijn een zelfstandige academische discipline (figuur 21) waarvan de opleiding tot geneesmiddelenonderzoeker en apotheker ondergebracht is bij de bètafaculteiten. De Farmaceutische Wetenschappen is sterk georganiseerd in de Federatie voor Innovatief Geneesmiddel Onderzoek Nederland (FIGON; www.figon.nl), een unieke combinatie van stakeholders uit industrie, academie, kliniek en overheid. Hierdoor zijn de interacties tussen de verschillende stakeholders in de farmaceutische sector sterk verbeterd en is de sector beter zichtbaar geworden. Een eigen Tafel binnen NWO of een KNAW-instituut zou de positie van het academisch-farmaceutische onderzoek in Nederland echter nog meer versterken en het academische onderzoek in Nederland ook beter kunnen positioneren ten opzichte van de farmaceutische industrie. De grote spelers in de farmaceutische industrie ontbreken echter in Nederland. Daarentegen, de goede infrastructuur, de uitstekende kwaliteit van Nederlandse afgestudeerden, het sterk innovatief vermogen van de Nederlandse samenleving en de potentie van de biotechnologische en life sciences sector (zoals in een recent onderzoeksrapport van de KPMG beschreven³⁷), zich uitende in het grote aantal MKB's in de farmaceutische sector en het hoge aantal patenten (nr. 2 in de wereld per hoofd van de bevolking), moeten voor de farmaceutische industrieën een stimulans vormen voor meer investeringen in Nederland. Een versterking van het fundamentele onderzoek, hoogstaand onderwijs en een sterke organisatie zijn daarvoor belangrijke voorwaarden.

ONDERZOEK

Om de Farmaceutische Wetenschappen als sterke fundamentele discipline te behouden en de ontwikkeling van innovatieve concepten voor geneesmiddelontdekking te bevorderen is investering nodig voor 1) het up-to-date houden en versterken van bestaande high-end infrastructuur met de daarbij behorende kennis (bijvoorbeeld *high-end genomics*, *metabolomics*, *proteomics*, *glycomics* en *imaging* faciliteiten) en 2) de ontwikkeling van nieuwe technologieën, waaronder computationele technologieën zoals *AI/data science*.

³⁷ KPMG (2019) rapport 'Unlocking the life sciences potential'



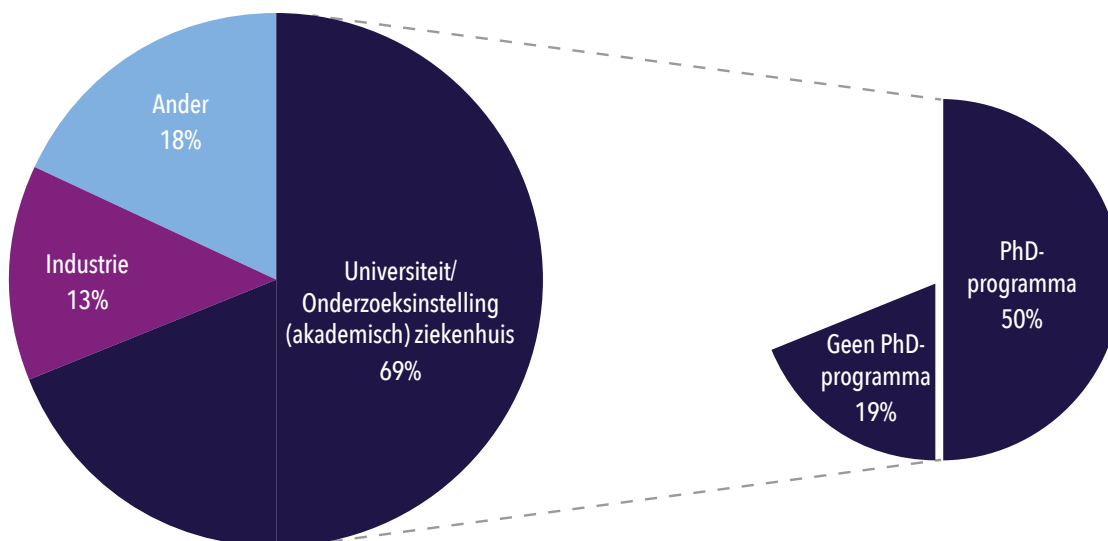
Hiermee kan onder andere een verreгаande integratie van ‘omics’ platform-technologieën worden gerealiseerd en innovaties in *drug target discovery platforms*, micro-analytische systemen voor *real-time* analyses van geneesmiddel-metabolieten en biomarkers in cellen en lichaamsvocht, genterapeutische strategieën, nanotechnologieën voor specifieke *targeting* van geneesmiddelen en technologieën voor de integratie van humane stamcellen en *lab-on-a-chip* modellen worden geïmplementeerd. Daarnaast is het van groot belang het onderzoek dat bijdraagt aan het ontwikkelen van een groeiende groep van geneesmiddelen van biologische oorsprong (biofarmaca, biologics) zoals cel- en genterapieproducten, vaccins en monoklonale antilichamen te versterken. De biologics vormen de laatste jaren een groot gedeelte van alle nieuw geregistreerde geneesmiddelen en bovendien past dit onderzoek uitstekend in een *personalized medicine* benadering waarbij de middelen kunnen worden aangepast aan de *druggable targets* die in de individuele patiënt worden gevonden. De coronaviruspandemie onderstreept het maatschappelijk belang van onderzoek naar deze klasse van geneesmiddelen. Gezamenlijk zal deze kennisinfrastructuur een sterke aantrekkende werking hebben op de farmaceutische- en biotechnologische sector en deze aan de frontlinie brengen van het mondiale fundamentele geneesmiddelenonderzoek.

ONDERWIJS

Hoogstaand fundamenteel farmaceutisch onderzoek en onderwijs zijn onlosmakelijk met elkaar verbonden en van groot maatschappelijk belang. De vraag vanuit de maatschappij om multidisciplinaire geneesmiddelenonderzoekers is hoog. Afgestudeerde farmaceutische wetenschappers en apothekers vinden momenteel allemaal snel een baan op niveau, in een tijd waarin de instroom van studenten sterk is toegenomen, zoals weergegeven in Figuur 23 en Tabel 4. De sector kampt echter reeds verscheidene jaren met capaciteitsproblemen die de kwaliteit van de opleidingen bedreigen. Door de verschuivingen in de sector en de toegenomen behoefte aan farmaceutisch deskundigen zouden er tussen de 185 en 210 extra apothekers per jaar moeten worden opgeleid.³⁸ Dit is een verdubbeling ten opzichte van de huidige aantallen (Tabel 4).

Het is gebleken dat een derde van de innovatieve farmaceutische bedrijven die zich in Nederland willen vestigen een probleem heeft bij het vinden van geschikte afgestudeerde (bio)-farmaceutisch wetenschappers (Kamerbrief staatssecretaris Keijzer, november 2019). Vanwege de grote vraag en beperkte capaciteit voor onderzoeks-gedreven onderwijs, hanteert de bacheloropleiding Farmacie (met daarin het onderzoeksgerichte studiep pad College of Pharmaceutical Sciences) in Utrecht sinds 2013 een *numerus fixus* en ook Bio-Farmaceutische Wetenschappen in Leiden zal vanaf 2021 de instroom beperken tot 250 studenten vanwege capaciteitsproblemen. Echter dit zijn slechts tijdelijke en geen structurele oplossingen; zonder versterking kan dus niet aan de vraag vanuit de maatschappij worden voldaan.

FIGUUR 23: AFGESTUDEERDE FARMACEUTISCHE WETENSCHAPPERS VINDEN MOMENTEEL SNEL EEN BAAN OP NIVEAU



Volgens de National Alumni Survey 2017, heeft 35% van de afgestudeerden direct na hun afstuderen een baan en 77% binnen 3 maanden. Ongeveer 50% van de afgestudeerden volgt een PhD-programma (vergeleken met een landelijk 'Science-gemiddelde van 34%). 69% werkt bij een universiteit/onderzoeksinstituut van (academisch) ziekenhuis en 13% in de industrie.

TABEL 4: INSTROOMGEGEVENS OPLEIDINGEN TOT GENEESMIDDEL-ONDERZOEKER/APOTHEKER

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
BSc Farmacie (Groningen)	127	171	130	132	143	165	162	168
BSc Bio-Farmaceutische Wetenschappen (Leiden)	142	187	215	282	285	245	282	335
BSc Farmacie + College of Pharmaceutical Sciences (Utrecht)	375	251	204	229	232	175	227	257
MSc Medical Pharmaceutical Science (Groningen)	21	18	15	16	17	18	23	20
MSc Bio-Pharmaceutical Sciences (Leiden)	46	52	80	58	88	78	102	105
MSc Drug Innovation (Utrecht)	33	36	46	33	56	30	50	47
MSc Farmacie (Groningen)	110	76	80	66	72	48	63	64
MSc Farmacie (Leiden)					25	38	39	50
MSc Farmacie (Utrecht)	141	119	142	151	126	112	125	132

Om Nederland een hoofdrolspeler te laten zijn in de revolutie van het geneesmiddelenonderzoek en voldoende hooggekwalificeerde geneesmiddelenonderzoekers te kunnen opleiden, is op korte termijn een krachtige impuls van de academische Farmaceutische Wetenschappen nodig in de vorm van een sectorplan.

BENODIGDE STEUN

Het sectorplan moet leiden tot gerichte investeringen in onderzoek naar kwaliteit, veiligheid en effectiviteit van innovatieve farmaceutische producten, zodat de farmaceut van de toekomst bij kan dragen aan effectievere, veiligere en beter betaalbare therapieën. Versteving van de onderzoeksrichtingen zal het meten aan therapeutische cellen en biomacromoleculen (kwaliteit), geavanceerde modellen ter vervanging van proefdieren (veiligheid) en systeemfarmacologie (effectiviteit) optimaal bevorderen.

Het sectorbeeld vormt de basis voor de verdere uitwerking van een integraal bètasectorplan waarin de Farmaceutische Wetenschappen optrekken met Biologie, Aard- en Milieuwetenschappen en Astronomie. Hierin wordt het implementatieplan en de toegevoegde waarde van de investeringen voor wetenschap en maatschappij verder uitgewerkt. De sectorgelden voor chemie waarborgen reeds de ontwikkeling van kleine, synthetische therapeutische moleculen. De ontwikkeling van AI, die hard nodig is voor implementatie in de Farmaceutische Wetenschappen, wordt door de sectorgelden aan Wiskunde en Informatica mogelijk gemaakt. Investering in de kern van de discipline, innovaties in geneesmiddelenonderzoek, is op dit moment niet geborgd en dient derhalve te worden afgedekt met een nieuw integraal bètasectorplan. Een plan voor de Farmaceutische wetenschappen zal vanwege het systeemdenken en problematiek synergetisch zijn met de plannen voor Biologie, Aard- en Milieuwetenschappen, maar ook met de reeds bestaande investeringen in Scheikunde, Informatica en Meettechnologie.



CONCLUSIE

ORGANISATIE DISCIPLINE EN VERVOLGSTAPPEN TEN BEHOEVE VAN SECTORPLAN

De eerste stap naar verdere invulling van een sectorplan voor Farmaceutische Wetenschappen is erkenning van het belang van een goed georganiseerde farmaceutische sector. De taskforce is daarom blij met de initiatieven die zijn genomen in samenwerking met de andere bèta-disciplines die Prof. Bert Meijer in zijn rapport 'Een nieuw fundament: beeld van de bètasector' benoemt. De taskforceleden van RUG, UL en UU hebben reeds regelmatig gezamenlijk overleg over onderzoek en onderwijs, waarbij ook adviseurs vanuit de farmaceutische industrie en het farmaceutische zorgveld worden uitgenodigd. Door met Biologie, Aard- en Milieuwetenschappen en Astronomie op te trekken is er een nog duidelijker beeld ontstaan hoe de sectoren zijn ingericht, waar ze zich mee bezighouden en welke gezamenlijke en unieke bijdragen geleverd kunnen worden aan het oplossen van maatschappelijke en wetenschappelijke vraagstukken.

De farmaceutische sector wil een wezenlijke bijdrage leveren aan de uitdagingen waarvoor onze samenleving zich gesteld ziet om de gezondheid en de welvaart van ons land en onze bevolking te borgen. Investing in kennis zal de innovatieve biotechnologische sector enorm stimuleren en de daarmee groeiende hoogopgeleide farmaceutische professionals Nederland hun positie versterken, waardoor ons land een grotere bijdrage kan leveren aan de wereldgezondheid. De Farmaceutische Wetenschappen zijn sterk georganiseerd in de FIGON, dat functioneert als een belangrijke koepelorganisatie die het netwerk samenbrengt, en verdient een zelfstandige plek binnen de bètasector. Wij zien ernaar uit deze waardevolle overlegstructuur nader te bestendigen in een platform Farmaceutische Wetenschappen Nederland wat de bestuurlijke en politieke slagvaardigheid van de sector zal versterken. Dit wordt tevens gedaan in nauwe samenwerking met de andere bèta- en technieksectoren om te komen tot een integraal sectorplan, in samenspraak met het ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap (OCW) maar ook met de ministeries van Economische Zaken en Klimaat (EZK) en Volksgezondheid, Welzijn en Sport (VWS). Het hierbij betrekken van top-onderzoeksinstituten als het NKI en het Hubrecht Instituut zal onze positie verder versterken. Investerings in fundamenteel onderzoek en een sterke organisatie van het veld zijn nodig om Nederland in de frontlinie te plaatsen van het mondiale geneesmiddelenonderzoek, een reële plek gezien de aanwezige potentie.

BIJLAGE

BIJLAGE 16. SAMENSTELLING TASKFORCE

SAMENSTELLING TASKFORCE

- Roos Masereeuw, voorzitter, Universiteit Utrecht
- Ed Moret, Universiteit Utrecht
- Miranda van Eck, Universiteit Leiden
- Hubertus Irth, Universiteit Leiden
- Erik Frijlink, Rijksuniversiteit Groningen
- Klaas Poelstra, Rijksuniversiteit Groningen

ONDERSTEUNING TASKFORCE

- Marjolein Robijn, NWO
- Ana de Castro, NWO
- Radboud Koop, NSO
- Michiel Kreutzer, bètadecaan, Universiteit Leiden

DIT SECTORBEELD KWAM VERDER TOT STAND DOOR INPUT VAN:

- Hans Schikan, Health Holland, voormalig CEO
Prosensa
- Jos Beijnen, Nederlands Kanker Instituut
- Douwe Breimer, voormalig rector magnificus
Universiteit Leiden

COLOFON

Oktober 2020

AARD- EN MILIEUWETENSCHAPPEN

Platform Aard- en Milieuwetenschappen
Faculteit Geowetenschappen, Universiteit Utrecht
Vening Meineszgebouw A
Princetonlaan 8a
3584 CB Utrecht
PlatformAMW@uu.nl

ASTRONOMIE

Nederlandse Onderzoekschool voor Astronomie (NOVA)
J.H. Oortgebouw
Niels Bohrweg 2
2333 CA Leiden
nova@strw.leidenuniv.nl

BIOLOGIE

Taskforce Biologie
Departement Biologie, Universiteit Utrecht
H.R. Kruytgebouw
Padualaan 8
3584 CH Utrecht
biologie@uu.nl

FARMACEUTISCHE WETENSCHAPPEN

Taskforce Farmaceutische Wetenschappen
Departement Farmaceutische Wetenschappen, Universiteit Utrecht
David de Wiedgebouw
Universiteitsweg 99
3584 CG Utrecht
science.uips@uu.nl

FOTOGRAFIE

iStock Photo tenzij anders vermeld

VORMGEVING

WAT ontwerpers, Utrecht

