

Repareren, verbeteren, verbouwen



De geopende ALICE-detector

De grootste deeltjesversneller ter wereld, de Large Hadron Collider in Genève, gaat op termijn met nog intensere bundels protonen de extremen van de deeltjeswereld verkennen. Sinds december hebben technici van deeltjeslab CERN twee jaar om de LHC-versneller daarop voor te bereiden. Voor de grote experimenten op CERN is de versnellerpauze een uitgelezen gelegenheid om apparatuur te repareren en soms zelfs ingrijpend te verbouwen.

DIMENSIES maakte een rondgang langs de koortsachtige werkzaamheden bij de Nederlandse groepen op CERN en in de Nikhef-werkplaatsen in Nederland. Van extra muonkamers voor ATLAS en het nieuwe hart van ALICE tot de totale make-over van het LHCb-experiment.

Nikhef en CERN

De Large Hadron Collider is de grootste deeltjesversneller ter wereld. In een 27 kilometer lange cirkelvormige tunnel bij Genève laat deeltjeslab CERN deeltjes met hoge energie op elkaar botsen. Op vier plaatsen in de ring zijn grote detectoren opgesteld die de botsingen nauwkeurig in kaart kunnen brengen en signalen vastleggen van de nieuwe deeltjes die ontstaan. Bij drie ervan, ATLAS, LHCb en ALICE, is Nederland via het Nationaal instituut voor subatomaire fysica Nikhef nauw betrokken. De metingen worden gebruikt om theorieën te maken en te testen over de bouwstenen van het universum.

ALICE Nieuw hart voor oerknal-detector

Het ALICE-experiment wordt geschikt gemaakt om veel meer botsende loodatomen tegelijk te kunnen bekijken dan voorheen.

In december botsten kort voor kerst op CERN middenin de ALICE-detector de voorlopig laatste loodkernen op elkaar en ontstonden nu en dan plasmadruppels van quarks en gluonen zoals kort na de oerknal hebben bestaan. Inmiddels is het voorjaar en staan diep onder de grond de grote rode deuren van de detector open en wordt er binnen druk gesleuteld aan de toekomst. Kabels worden losgehaald, onderdelen los geschroefd en weggetakeld. ALICE krijgt een nieuw hart, zeggen betrokkenen met gevoel voor drama.

ALICE-fysicus Paul Kuijer van Nikhef houdt een onderdeel van dat nieuwe hart voor zich op zijn hand. Drie staafjes koolstofvezel zo dun als een lucifer zijn met nog dunnere schuine dwarsverbindingen samengebracht in een verrassend stijve driekanten draagarm, een paar centimeter in doorsnee.

De vederlichte vakwerkconstructie is in al zijn nietigheid een cruciaal onderdeel van het 10 duizend ton wegende ALICE-experiment op CERN dat op een bijzondere manier naar het samenspel van quarks en gluonen kijkt. Die detector, een kleine 60 meter onder de grond, is volgepakt met sensoren die de brokstukken en straling van botsingen kunnen detecteren en vastleggen.

De ijle draagarmen, zegt Kuijer, zijn met kennelijk eindeloos geduld handgemaakt door Russische partners in het ALICE-experiment op CERN. Ze vormen de drager waarop dit voorjaar in een cleanroom op Nikhef siliciumpixel-chips worden verlijmd, plus koeling, plus bekabeling en ingebouwde elektronica. Elke chip heeft ruim een half miljoen microscopische pixels, die elk gevoelig zijn voor passerende hoogenergetische deeltjes. *Staves* worden de balkjes vol sensoren formeel genoemd, naar het Engels voor de duigen in een houten ton.

Deeltjescamera

Deze duigen worden onderdeel van de nieuwe vatvormige binnenste deeltjescamera, het Inner Tracking System, of kortweg ITS. De ITS is ongeveer een halve meter in diameter en het onderdeel dat het dichtst bij de botsingen in de bundelpijp zit. In de vorige versie bekeek het experiment de lood-loodbotsingen vanaf minimaal 3,9 centimeter afstand, de diameter van de bundelpijp in het experiment. De nieuwe binnendetector komt tot op 2,3 centimeter. Het klinkt als een klein verschil, maar het geeft enorm veel meer detail.



ITS-draagarm in de Nikhef-cleanroom

In totaal heeft de deeltjescamera een oppervlak van 10 vierkante meter met ruim 12,5 miljard actieve pixels en minimaal energieverbruik. Het apparaat is in staat om tot op 5 duizendste millimeter precies een passerend deeltje te registreren.

Een *stave* betekent ongeveer een week geconcentreerd handmatig montagewerk, zegt ALICE-postdoc Goran Simatovic van Nikhef. In totaal zijn er voor de ITS honderd nodig, waarvan Nikhef er vijftwintig zal assembleren, testen en vershippen naar Genève. 'We moeten leren om flink tempo te maken', realiseert Simatovic zich.

Trillingsvrij

Rond de jaarwisseling zijn de eerste paar Amsterdamse detectorduigen al in speciale trillingsvrije kratten naar CERN in Genève vervoerd, waar ze aan scherpe kwaliteitscontroles worden onderworpen. Nikhef is een van de vier labs in de wereld die zich wijden aan de massaproductie van de pixel-detectors. Aan het nieuwe binnenwerk wordt al sinds 2010 intensief gewerkt.

LHCb Facelift voor de beauty-fysica

De LHCb-detector op CERN krijgt de komende twee jaar een ingrijpende makeover.

Diep onder de grond op toegangspunt-8 van CERN in Genève spert de LHCb-detector dezer dagen zijn karakteristieke muil voor ploegen gehelme wetenschappers en technici. Terwijl elders aan de LHC-versneller wordt gesleuteld, gaat meteen ook het experiment rond zogeheten beauty-fysica flink op de schop.

Nederland bouwt via Nikhef mee aan twee verbeteringen van LHCb: de VELO aan het begin van de detector, en de SciFi verderop.

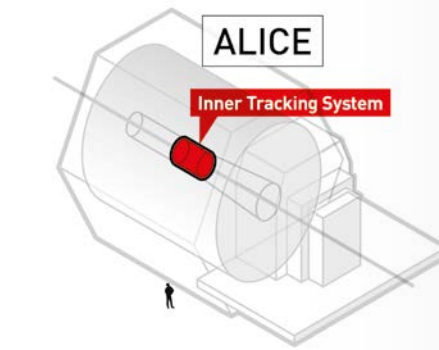
Uitgangspunt voor de upgrade-operatie is dat ALICE tot 100 keer meer meetgegevens kan gaan verzamelen dan in eerdere meetrondes van de versneller. Ook de elektronica zal door snellere en modernere versies worden vervangen, inclusief de trigger-apparatuur die beslist welke botsingen bijzonder genoeg zijn om vast te leggen. Het computersysteem dat data verzamelt en toegankelijk maakt wordt eveneens vernieuwd.

Het nieuwe hart van ALICE wordt rond de zomer van 2019 bovengronds op CERN in elkaar gezet en daar ook getest. Tegelijk wordt ook nieuwe elektronica ingebouwd, deels ontwikkeld door de ALICE-groepen van Nikhef en de Universiteit Utrecht. De elektronica is zo goed mogelijk bestand tegen de straling dichtbij de botsende loodbundels. In de loop van 2020 wordt de apparatuur onder de grond in ALICE ingebouwd en nog verder getest, zeggen de planschema's. De deadline is duidelijk. Begin 2021 komt de LHC-versneller met een intensere bundel en meer energie weer in bedrijf.

Sensoren

Natuurkundige Wouter Hulsbergen van Nikhef is vooral betrokken bij de nieuwe VELO-detector. Voor de originele LHCb bouwde Nikhef vooral mee aan de benodigde infrastructuur voor VELO: delen van de vacuümtank, het systeem dat onderdelen mechanisch van en naar de bundel kan bewegen, koeling. 'Bij de huidige upgrade concentreren we ons juist sterk op de sensoren.'

In een van de cleanrooms van Nikhef in Amsterdam laat Hulsbergen, gehuld in verplichte witte labjas en haarnetje, zien waar zijn team sensormodules gaat



ALICE-detector

Het ALICE-experiment op CERN maakt vooral van de LHC-versneller gebruik als die geen protonen rondjaagt, maar de veel zwaardere kernen van loodatomen. Als die botsen versmelten door alle energie die kerndeeltjes en ontstaat een ziedend plasma van quarks en gluonen, dat ook bij de oerknal heeft bestaan. ALICE is 26 meter lang en 16 meter hoog en weegt circa tienduizend ton. Met grote inbreng van Nikhef wordt in de huidige upgrade het Inner Tracking System gemoderniseerd.



SciFi-panels in de maak

assembleren. Die modules komen uiteindelijk het dichtst bij het botsingspunt in de versneller te staan in de zogeheten VELO, zoals de vertex locator kortweg heet. Als een supersnelle digitale camera gaat dat apparaat het ontstaan van nieuwe geladen deeltjes uit de protonbotsingen vastleggen. Preciezer dan het oude systeem kon, en vooral ook voor veel meer deeltjes tegelijk.

'In feite bouwen we een geheel nieuwe detector', zegt LHCb-groepsleider Marcel Merk van Nikhef over de twee omvangrijke Nederlandse projecten, die de huidige

rustpauze van twee jaar helemaal in beslag nemen. LHCb is bedoeld voor het bestuderen van zogeheten beauty-fysica van deeltjes die zware quarks als beauty of charm bevatten en die verschillen tussen materie en antimaterie kan blootleggen.

Doel van het nieuwe systeem is om alle gemeten deeltjes vast te leggen, waar eerder een zogeheten trigger in de eerste oogwenk besloot of een signaal daarvoor wel interessant genoeg leek. Per bundelbotsing kon tot nog toe gemiddeld één proton-protonbotsing worden bekeken; in het vervolg zijn dat er zo'n 7 en worden tot 30 keer zoveel data genomen. Meer meetgegevens, is de hoop, geven meer zicht op heel zeldzame verschijnselen.

Nikhef gaat 30 van zulke modules in elkaar zetten: 26 voor de LHCb-vertex-detector, en nog vier als reserve. Britse universiteiten bouwen de rest. Voor de zomer moet de klus geklaard zijn, zegt Hulsbergen.

Freesmachine

Onderdelen voor al die modules, van de grote silicium koelvin met ingeëtste microkanalen die verhitte voorkomt tot de speciale 256x256 pixelchips met micro-elektronica en hoogspanningsaansluitingen, worden door andere instituten in de hele wereld aangeleverd. Het Nikhef-team plakt en soldeert alle delen met extreme precisie aan elkaar, goeddeels handmatig, en stuurt het eindproduct na eigen tests naar een lab in Liverpool.

De pixelchips van ongeveer 1 bij 3 centimeter liggen in een L-vorm op het uiteinde van elke module, zodat ze in hun binnenhoek vlakbij de bundelpijp kunnen komen. De 26 modules staan in een uitgekend patroon op lange dunne stelten exact in elkaars verlengde en vormen met hun uiteinden de helft van een denkbeeldige tunnel die de bundel uiteindelijk zal omsluiten. Een tweede set van 26 zal de bundel van de andere kant insluiten.

Uniek aan de VELO is dat het instrument uit twee beweegbare helften bestaat, die mechanisch meer of minder dichtbij de bundel kunnen worden gebracht. De twee delen bevinden zich in een ander staaltje precisiewerk van Nikhef, de zogeheten RF-boxen. Dat zijn wigvormige aluminium trommels die precies om de rijen van 26 pixelmodules vormgegeven zijn, en die deze modules in het benodigde vacuüm houden.

In een reusachtige computergestuurde freesmachine creëren technici van de mechanische werkplaats in Amsterdam elke box uit een massief blok aluminium. Elke trommel, zegt Hulsbergen, is zeker vier maanden werk.

SciFi

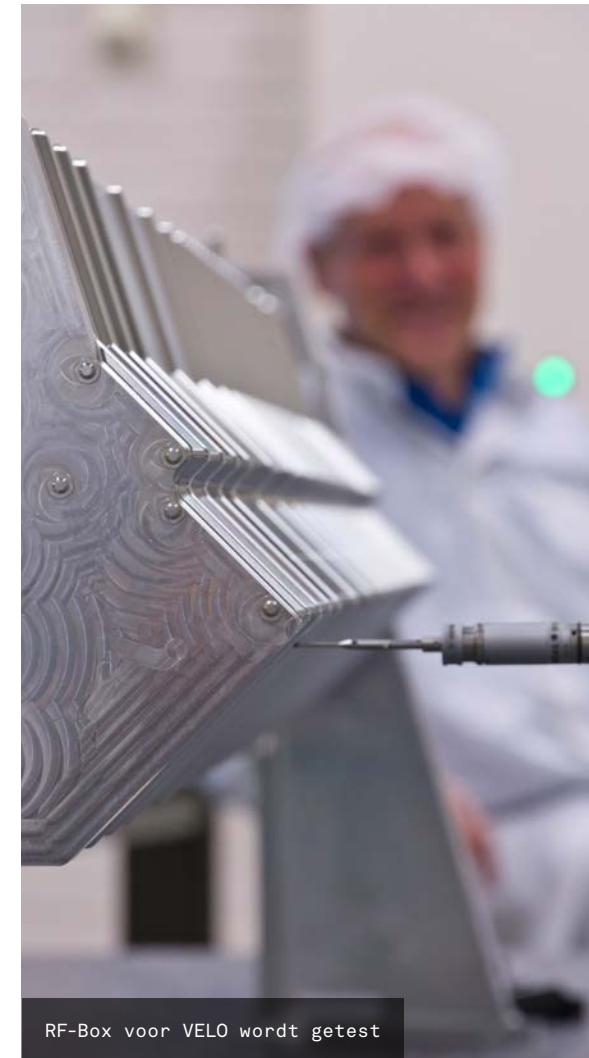
De VELO vormt in feite het beginpunt van de meetrein die LHCb verder loslaat op proton-protonbotsingen uit de LHC-versneller. De trechtervormige opstelling meet met hoge precisie deeltjesprocessen in de voorwaartse richting. Na de VELO-vertexdetector, die de plaats van de botsing moet bepalen, volgt nog een batterij aan trackers en muonkamers. Een deel daarvan is omringd door een gigantische elektromagneet, die geladen deeltjes een gekromde baan moet geven en die door alle sloopwerkzaamheden inmiddels oogt als een vervaarlijke open-gesperde bek.

Nikhef speelt ook een grote rol bij één van de detectorlagen na de magneet, een project dat pakkend SciFi heet, van *scintillating fibers*. Dat is een dicht pakket glasvezeldraden waarin passerende deeltjes een lichtflits veroorzaken die aan het uiteinde van elke fiber opgevangen wordt met een digitale fotochip.

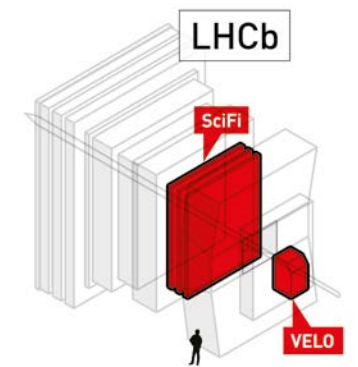
Panelen

In het nieuwe systeem is zo'n 11.000 kilometer glasvezel verwerkt. Daarvan zijn matten vervaardigd die uiteindelijk in 140 panelen van 5 bij 0,5 meter zijn geplaatst. Nikhef construeerde 40 van zulke panelen. Daarnaast bouwt Nikhef een speciaal 3D-geprint titanium koelsysteem waarmee de detectoren tot 40 graden onder nul kunnen worden afgekoeld.

Begin dit jaar zijn onder toezicht oog van SciFi-projectleider Antonio Pellegrino in Amsterdam de SciFi-panels van Nikhef in kratten met een vorkheftrac voorzichtig in de vrachtwagen geladen voor transport naar Genève. Inmiddels werkt een team van onder meer Nederlandse technici bovengronds op de LHCb-site aan de integratie van de panelen. Pellegrino is er week op week af zelf bij. Voorjaar 2020 moet het geheel door de schacht naar beneden en is de metamorfose van de LHCb-detector weer een stap dichterbij.



RF-Box voor VELO wordt getest



LHCb-detector

Het LHCb-experiment is een detector die in één bundelrichting met hoge precisie de botsingsprocessen van protonen bestudeert. De nadruk van het onderzoek ligt op het ontdekken van verschillen tussen materie en antimaterie. De asymmetrische detector is 21 meter lang en 10 meter hoog, en heeft een opvallende trechtervorm. Nikhef bouwt mee aan de nieuwe centrale VELO-detector rond de protonbotsingen in LHCb, en SciFi-detectorplaten verderop in het systeem.

ATLAS Radertjes in de reuzendetector

Het ATLAS-experiment zet nu al stappen om de toekomstige LHC-versneller bij te kunnen benen.

Fysicus Tristan du Pree van Nikhef opent de deur van een hangar op een uithoek van het CERN-terrein bij Genève. Kijk, wijst hij naar twee reusachtige lichtblauwe cirkelschijven in grote stalen jukken aan een wand in de verte: de New Small Wheels (NSW). 'Op CERN is klein nog steeds groot', lacht hij.

Gehelme CERN-monteurs manoeuvreren zichzelf in een hoogwerker naar de juiste werkpositie om meanderende kabels en leidingen op een van de schijven te draperen. Beneden turen experts afwisselend mee naar de werkzaamheden en naar hun beeldschermen met bouwtekeningen. Millimeterwerk op een reuzenschaal is het.

De NSW vormen momenteel misschien wel het meest tastbare deel van de upgrades die de grote ATLAS-detector op CERN de komende twee jaar ondergaat. De twee cirkelschijven omvatten kamers met gasbuizen die muonen betreffen die ontstaan bij de protonbotsingen in de LHC-versneller. Muonen, zwaardere verwanten van het bekende elektron, geven een spoor van elektrische ontladingen in het gas in de detector.

De New Small Wheels worden deel van de zogeheten trigger van ATLAS, het systeem dat helpt beslissen welke botsingen interessant genoeg zijn om er meetgegevens van te bewaren.

Muonkamers

Du Pree coördineert gedurende de LHC-versnellerpauze tot 2021 voor Nikhef het onderhoud aan de al bestaande muondetectoren op de ATLAS-detector.

Die liggen als een schild om een groot deel van de immense ondergrondse detector heen en zijn deels gebouwd door Nikhef. Sommige kamers zijn defect en moeten vervangen worden. Op termijn worden ze allemaal vervangen door systemen met dunnere gasbuizen, die meer details kunnen vastleggen.

Nikhef is van oudsher hoofdrolspeler in het uitlijnen van de muonkamers in ATLAS. Weten waar een signaal vandaan komt, is cruciaal om botsingen te reconstrueren en begrijpen. In ATLAS wordt daartoe een Nederlands uitlijnsysteem met rode lasers en videocamera's gebruikt. Bij een toekomstige versnellerpauze in 2024-2025 gaat dat vervangen worden door een systeem met nieuwe blauwe lasers en chipsensoren, vooral omdat die beter tegen de straling in de detector bestand zijn.

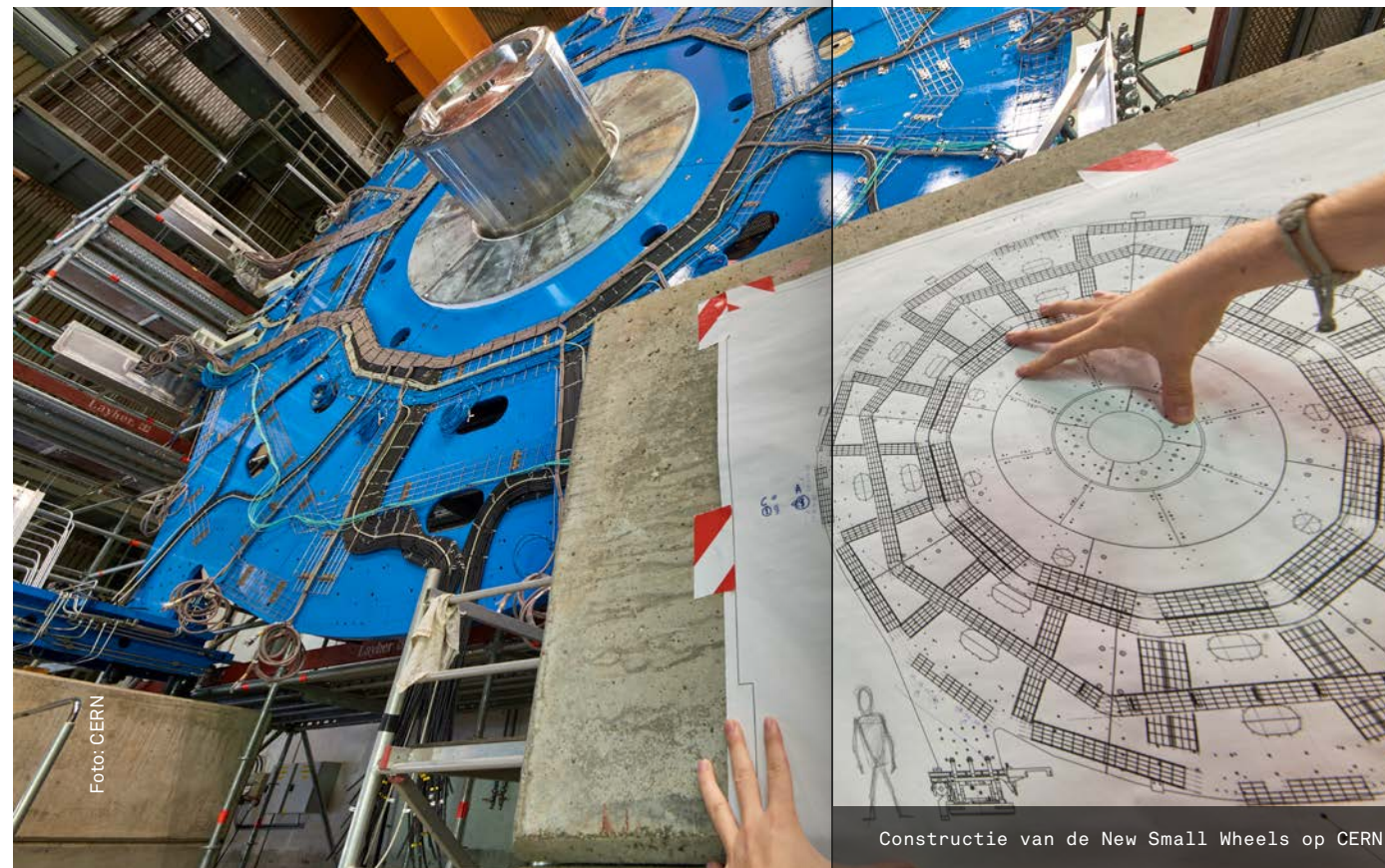
Du Pree heeft rode printplaatjes met het vertrouwde Nikhef-logo op zijn bureau liggen die de basis voor het nieuwe uitlijnsysteem moeten worden. Kleine elementjes in een reusachtige internationale samenwerking tussen fysici, elektronici, de mechanische werkplaatsen en informatici. '2025 klinkt verder weg dan het is', zegt hij met een blik op de imposante werkschema's.

Magneetsensoren

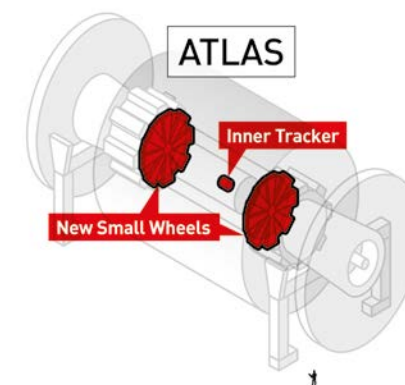
Op de New Small Wheels is de bijdrage van Nikhef relatief beperkt. Anderen ontwerpen en bouwen de systemen, maar Nederland levert sensoren voor magneetvelden en temperatuur. 'Dat klinkt niet heel spectaculair, maar elk onderdeel telt', zegt Du Pree.

Met het oog op de toekomstige data-vloed zal voor het eerst ook nieuwe elektronica voor data-afhandeling worden gebruikt: het digitale FELIX-systeem dat de laatste tien jaar ondermeer bij Nikhef in Amsterdam is ontwikkeld. Als het werkt, kan het later de standaard worden voor de uitlezing van het hele muonsysteem.

Komende augustus, vermelden de werkschema's, wordt het eerste New Small Wheel omlaag gelaten en gemonteerd. Of het tweede exemplaar ook de komende twee jaar wordt geplaatst, staat nog te bezien. ◀



Constructie van de New Small Wheels op CERN



ATLAS-detector

De ATLAS-detector is de grootste deeltjesdetector op CERN. De installatie op 100 meter onder de grond is met 46 meter lengte en 25 meter diameter ongeveer zo groot als het Paleis op de Dam in Amsterdam. ATLAS ligt om de bundelpijp van de LHC-versneller en vangt de deeltjes die ontstaan bij botsingen van protonen. Hij werd gebouwd voor de jacht op het higgsdeeltje en het ontdekken van nieuwe deeltjes en processen. De ATLAS-groep bij Nikhef werkt bij de upgrade aan de muonkamers, uitlijnsystemen, en op termijn de nieuwe centrale ITk-detector.

Voor de volgende shutdown: ITk

Nikhef speelt een belangrijke rol in het Inner Tracker (ITk)-project voor ATLAS, een upgrade die pas na 2024 plaatsvindt. De binnenste laag van de ATLAS-detector, die om het punt heen zit waar de bundels op elkaar botsen, wordt volledig vervangen. Zo kan het hart van de detector het straks weer aan om de deeltjessporen uit het interactiepunt heel nauwkeurig te reconstrueren. Ook als de High-Luminosity LHC vanaf ongeveer 2026 een nog veel intensere stroom aan botsingen gaat produceren.

Opgebouwd uit een middenstuk (de *barrel*, cilindrische 'tonnen' die om elkaar heen zitten) en twee eindstukken (de *endcaps*, verticale schijven die achter elkaar geplaatst zijn) omsluit de Inner Tracker het interactie-punt. Het apparaat van 6 meter lang en 2 meter doorsnee gaat helemaal bestaan uit silicium-pixel- en siliciumstripdetectoren. Dat is enorm groot voor zo'n soort detector.

Op Nikhef ontwerpen en bouwen technici de mechanische draagstructuur voor de twee *endcaps* van de silicium-stripdetectoren. 'De grote uitdaging is dat deze structuren in feite oneindig stijf moeten zijn, maar tegelijkertijd eigenlijk geen massa mogen hebben', zegt ingenieur Jesse van Dongen van de afdeling

Mechanische Technologie. Samen met ingenieur Martin Doets is hij verantwoordelijk voor ontwerp en constructie van dit project. 'We maken de structuur nu van koolstofvezel met epoxy. Andere onderdelen zijn van kunststof, zoals Torlon. Metalen gebruiken we niet meer. Binnen Nikhef hebben we ondertussen expertise opgebouwd hoe we deze moderne materialen het beste kunnen toepassen.'

In de mechanische werkplaats op Nikhef is een prototype te zien. 'We zijn trots dat ons ontwerp recent goedgekeurd is door de ATLAS-collaboratie. We staan op het punt om binnenkort te beginnen met de productie', voegt Van Dongen toe.

Per *endcap* moeten deze draagstructuren zes lagen van 32 bloemblad-vormige siliciumstrip-detector-modules herbergen, de *petals*. Nikhef neemt de volledige integratie van één van de *endcaps* voor zijn rekening. Hiervoor is al één van de Nikhef cleanrooms gereserveerd die nogal druk in gebruik zijn voor alle upgrades. In 2021 arriveren de *petals* die op andere instituten worden gemaakt. Rond 2024 gaat de geïntegreerde en geteste *endcap* naar CERN.



Prototype van een draagstructuur voor ITk in de Nikhef-werkplaats