

# De onbekende structuur van het proton ontdekken met behulp van quarkoniumproductie

**De Electron-Ion Collider (EIC) die in Brookhaven National Laboratory in de Verenigde Staten zal worden gebouwd gaat de interne structuur van protonen en neutronen tot ongekeerde details onderzoeken. Met deze deeltjesversneller worden de fundamentele bouwstenen bestudeerd, de quarks en de gluonen, door hoogenergetische elektronenbundels te bombarderen met protonen- of zware-ionenbundels. Een van de vele vragen die met behulp van het EIC-experiment kan worden onderzocht is: hoe zijn de gluonen binnen het proton verdeeld? Vanwege moderne detectoren en een breed bereik aan botsingsenergieën zal de EIC de toegang geven tot nooit eerder beschikbare informatie over de kerndeeltjes.**

**O**oit dachten we dat de beide kerndeeltjes – het elektrische geladen proton en het ladingsneutrale neutron – de elementaire bouwstenen zijn van alle materie. Inmiddels weten we dat deze kerndeeltjes zelf uit drie valentie-quarks bestaan, die het deeltje zijn lading geven en die bij elkaar worden gehouden door gluonen: de dragers van de sterke kernkracht. Naast deze quarks komen in een kerndeeltje veel kortlevende quark-antiquarkparen voor en gluonen die met elkaar interacties hebben, die ook bijdragen aan de eigenschappen zoals de massa. Maar hoe dat allemaal precies werkt, daar is nog veel over onbekend. Wel weten we dat als we een kerndeeltje laten botsen met een ander deeltje, dat dit deeltje kan verstrooien aan een van de bouwstenen van het kerndeeltje. Die bouwstenen noemen we partonen. Bij lage botsingsenergieën zal het deeltje voornamelijk met de valentie-quarks verstrooien, maar bij hoge energieën ook met de ‘zee’ van quark-antiquarkparen en gluonen zoals afgebeeld in figuur 1.

Voor zulke botsingen kunnen we theoretische modellen ontwikkelen die vergeleken kunnen worden met experimenten om meer over de interne structuur van bijvoorbeeld het proton te weten te komen. Specifiek zijn we op zoek naar distributiefuncties die de kans beschrijven dat een botsend deeltje aan een bepaald parton in het proton wordt verstrooid. Er is dus voor elk parton een distributiefunctie. Over de quarkdistributiefuncties weten we al heel wat, echter, er is veel minder bekend over die van de gluonen. Mijn promotieonderzoek heeft dan ook als doel om meer over de gluondistributiefuncties van het proton te weten te komen. In het bijzonder proberen we met een theoretische bril de gluondistributiefuncties te bestuderen

door gebruik te maken van quarkoniumproductie in elektron-protonbotsingen. Deze modellen kunnen dan in de toekomst vergeleken worden met metingen van het EIC-experiment.

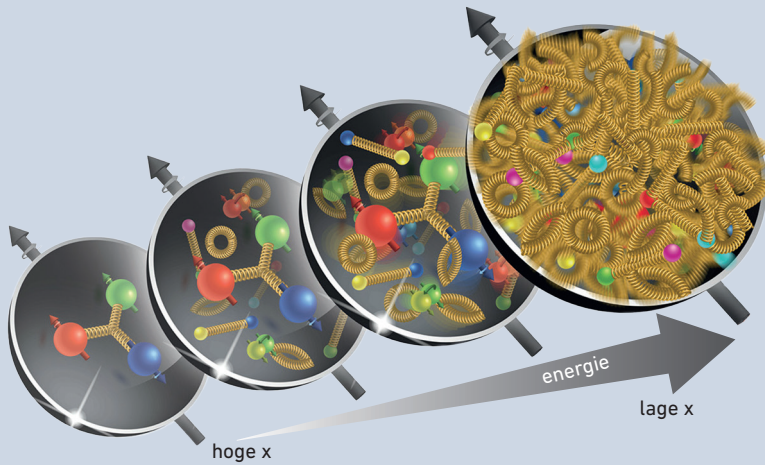
### **Quantumchromodynamica in het kort: van proton tot quarkonium**

Het ouderwetse plaatje van een proton bestaat uit drie quarks: twee ‘up’ en een ‘down’. Echter, door de kortlevende quark-antiquarkparen kunnen alle zes soorten quarks worden gevonden in het proton, naast ‘up’ en ‘down’ ook ‘strange’, ‘charm’, ‘bottom’ en ‘top’. Daarnaast bevat het proton gluonen die de quarks vanwege hun kleurlading bij elkaar houden, wat beschreven wordt door de veldentheorie quantumchromodynamica. Deze theorie vertelt ook dat kracht tussen de quarks niet verdwijnt wanneer ze ruimtelijk van elkaar gescheiden worden. Wanneer dat toch wordt gedaan groeit de energie totdat er spontaan nieuwe deeltjes worden geproduceerd. Quarks komen dus nooit alleen voor, maar zijn altijd aan elkaar gebonden door de gluonen. Dit maakt het erg lastig om de interne structuur van het proton te bestuderen.

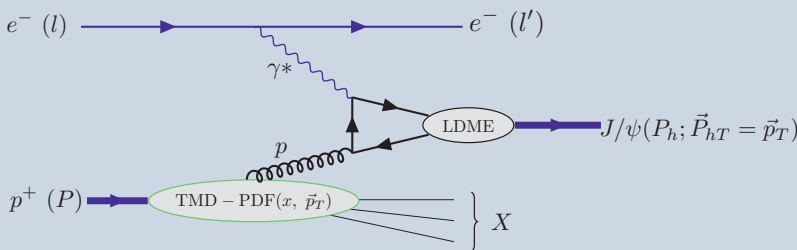
In quantumchromodynamica zijn er drie kleurladingen (en drie antikleurladingen): rood, groen en blauw, en het is arbitrair welke kleurlading de quarks in een deeltje hebben zolang ze samen maar kleurneutral zijn. De bekendste voorbeelden zijn deeltjes die bestaan uit drie quarks met verschillende kleurladingen (rood, groen en blauw) zoals het proton en het neutron, of die bestaan uit een quark en een antiquark met een kleurlading en de bijbehorende antikleurlading (bijvoorbeeld rood en antirood). Quarkonium is een voorbeeld van het laatste, namelijk een gebonden toestand van een quark en een antiquark



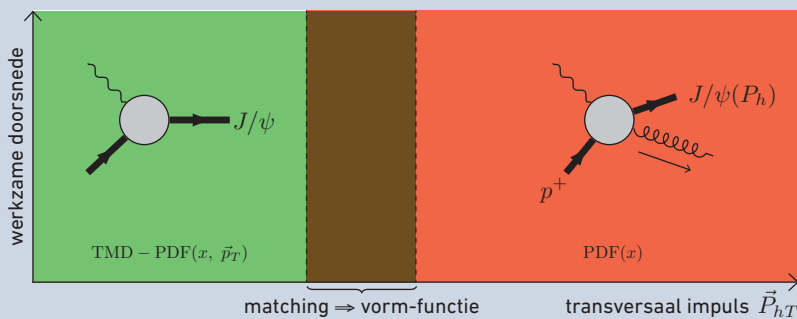
**Jelle Bor** rondde in 2019 met lof zijn onderzoeksmaster in de natuurkunde van het quantumuniversum af aan de RUG. In 2021 begon hij met zijn promotieonderzoek. Hij werkt bij twee onderzoeksgroepen, bij het Van Swinderen Instituut aan de RUG en het IJCLab aan de Université Paris-Saclay. [jellebor.com](http://jellebor.com)



Figuur 1. Illustratie van de interne structuur van het proton. De quarks worden weergegeven als gekleurde ballen en de gluonen als veren. Figuur: Courtesy of Brookhaven National Laboratory.



Figuur 2. Schematische weergave van de bestudeerde  $J/\psi$ -productie in een elektron-protonbotsing: de twee uitgaande quarks vormen het quarkonium. Tussen haakjes is het bijbehorende impuls aangeven van de deeltjes, voor de partonische gluon is dit aangegeven met een  $p$ . De transversale impuls van een deeltje is aangegeven met een onderschrift  $T$ . Voor verduidelijking zijn alle bekende deeltjes in dit proces aangegeven met paars.



Figuur 3. Schematische weergave van  $J/\psi$ -productie in een elektron-protonbotsing als een functie van het transversale quarkoniumimpuls. Dit proces kan zowel met TMD-PDF's (links) als met PDF's (rechts) bestudeerd worden. Waar de twee theoretische beschrijvingen overlappen kunnen we de werkzame doorsnede matchen om de vorm-functie te vinden.

van dezelfde soort. Specifiek verwijst quarkonium altijd naar charmonium, een 'charm-anticharm' gebonden toestand of bottomonium, een 'bottom-antibottom' gebonden toestand. Quarkoniumproductie is een handige methode om de gluondistributiefuncties te bestuderen. Bijvoorbeeld door een elektron-protonbotsing omdat er dan twee quarks van dezelfde soort worden geproduceerd. Dit wordt in het volgende gedeelte nader uitgelegd. In het algemeen kan quarkonium in verschillende soorten configuraties worden geproduceerd, maar om het overzichtelijk te houden kijken we hier alleen naar  $J/\psi$ -productie, de meest voorkomende configuratie van charmonium in experimenten en tevens het eerst ontdekte quarkoniumdeeltje in 1974.

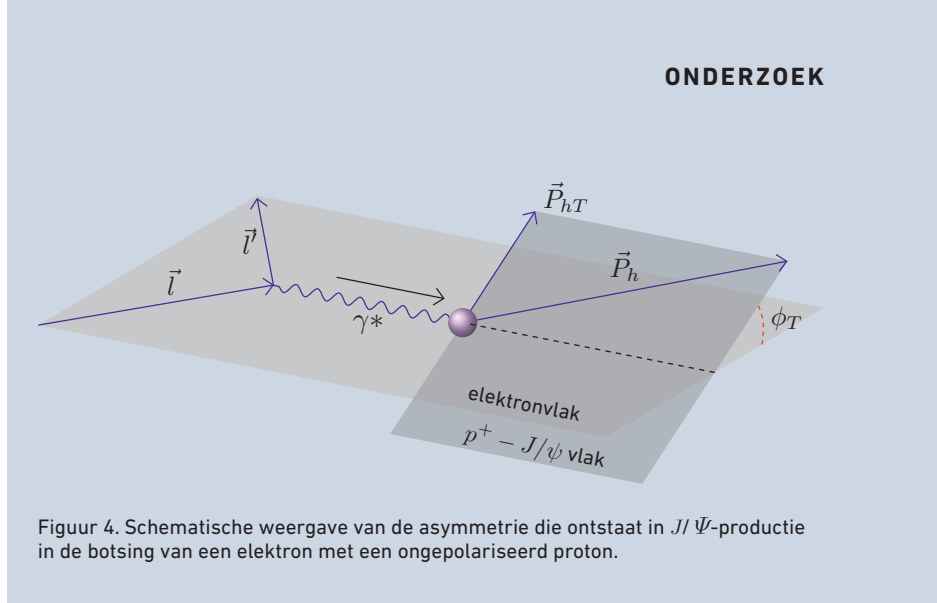
### $J/\psi$ -productie en gluondistributiefuncties

Om distributiefuncties te kunnen bestuderen in een specifiek proces moet het mogelijk zijn het proces te ontbinden in factoren. Hiermee bedoelen we dat de werkzame doorsnede een product is van de distributiefuncties en een storingsrekening. De werkzame doorsnede is de totale kans voor het specifieke proces en kunnen we meten in een experiment. De storingsrekening is iets wat we kunnen berekenen aan de hand van theorie. Met andere woorden, 'distributiefunctie x theorie = experiment' is nodig om een distributiefunctie te vinden.

$J/\psi$ -productie in een elektron-protonbotsing werkt als volgt: we verstrooien een elektron ( $e^-$ ) aan een gluon van het proton ( $p^+$ ) door middel van een virtueel foton ( $\gamma^*$ ) zoals afgebeeld in figuur 2. In dit proces wordt alleen het uitgaande elektron en de  $J/\psi$  gemeten die is geproduceerd. De overige deeltjes die niet worden gemeten en afkomstig zijn van het proton zijn aangegeven met  $X$ . De begintoestand is daarnaast volledig bekend en bepaald door het experiment. In het midden, waar de deeltjes een bepaalde interactie hebben, wordt de storingsrekening toegepast die gebaseerd is op een kleine koppeling tussen de deeltjes. Hiervoor gebruiken we zowel quantumelektrodynamica als

quantumchromodynamica. Quantum-elektrodynamica vertelt ons dat deeltjes met een elektrische lading, het elektron en de quark, op elkaar inwerken door middel van uitwisseling van fotonen. Hierbij is de koppeling tussen de fotonen en de elektrisch geladen deeltjes, zoals we willen, klein. Quantumchromodynamica wordt daarentegen toegepast op de deeltjes met een kleurading, de quark en het gluon. De koppeling tussen quarks en gluonen is echter alleen klein bij hoge energieën, doordat quantumchromodynamica asymptotische vrijheid bevat. Met andere woorden, om een storingsrekening toe te kunnen passen moet het proces hoogenergetisch zijn. Dit laatste doen we door het foton een hoge energie te geven. Per definitie vertelt de storingsrekening dat de simpelste interactie tussen de deeltjes van leidende orde is, daarom wordt er dus in het diagram alleen een quark en een antiquark geproduceerd van dezelfde soort. Complexere interacties geven een hogere macht van de koppeling waardoor deze dus een kleinere bijdrage geven en in feite een correctie zijn van het leidende-ordediagram.

Vervolgens binden we de twee uitgaande quarks tot een  $J/\psi$ , anders zullen de quarks kleurloze deeltjes produceren omdat de quarks niet los kunnen bestaan. We doen dit met behulp van het zogenoemde niet-perturbatieve lange-afstand-matrixelement (LDME) die de verbinding van de quarks tot het specifieke quarkonium beschrijft. In praktijk is dit een getal dat is gevonden door middel van andere experimenten waarbij  $J/\psi$  wordt geproduceerd. Vanwege impulsbehoud kunnen we nu aan de hand van deze reactie de longitudinale impulsfractie  $x$  (de hoeveelheid impuls die een parton van het proton afpakt) en de tweedimensionale transversale impuls van het parton (ten opzichte van de botsingsrichting) vinden. Namelijk, als we kijken vanuit de situatie waar het foton en het proton geen transversale impuls hebben, is nu de transversale impuls van de  $J/\psi(P_{hT})$  direct gerelateerd aan de transversale impuls van het gluon ( $p_T$ ). Met eventuele metingen van dit proces kan dus de driedimensionale gluon-



Figuur 4. Schematische weergave van de asymmetrie die ontstaat in  $J/\psi$ -productie in de botsing van een elektron met een ongepolariseerd proton.

distributiefunctie worden bepaald, die we een transversale-impulsafhankelijke parton-distributiefunctie (TMD-PDF) noemen.

De TMD-PDF's zijn een generalisatie van de PDF's die alleen van de impulsfractie  $x$  afhangen. De eendimensionale PDF's zijn namelijk, waar het mogelijk is om theorie en experiment naast elkaar te leggen, al wel met grote precisie bekend. Ook weten we inmiddels over de quark-TMD-PDF's al het een en ander door andere toegankelijke processen, maar van de gluon-TMD-PDF's daarentegen nog niets. Daarom is het juist zo belangrijk om processen zoals deze te identificeren en te bestuderen.

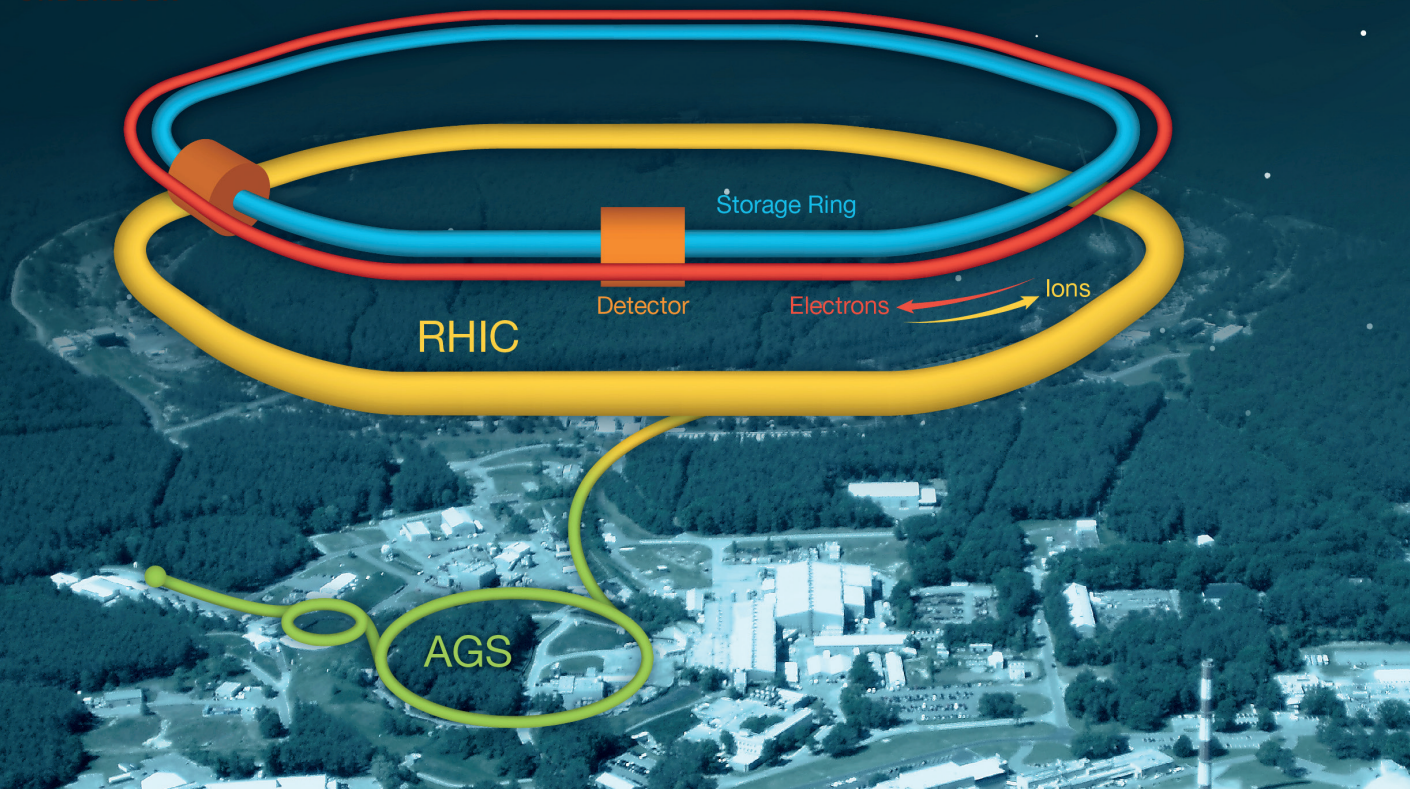
### De vormfunctie: een kleine omleiding

Als we  $J/\psi$ -productie in figuur 2 bekijken is het volgende op te merken: doordat het gluon een combinatie van kleuren draagt is de eindtoestand van de  $J/\psi$  niet kleurneutraal. Om vervolgens kleurneutraal te worden moet de  $J/\psi$  lage-energie-gluonen uitzenden. Dit wordt beschreven met de vormfunctie, die per definitie ook de LDME bevat, en deze functie moet dus worden meegenomen in de werkzame doorsnede. Alhoewel dit een relatief nieuwe functie is waar nog weinig over bekend is, zijn we erin geslaagd om de vormfunctie te vinden voor dit proces [1, 2]. Dit doen we met behulp van een matchingberekening, die werkt als volgt. Om het proces te kunnen beschrijven met de TMD-PDF's moet de transversale impuls van het quarkonium in de

eindtoestand klein zijn ten opzichte van de hoge-energieschaal van het proces. Deze energieschaal wordt gedictieerd door de impuls van het foton. Aan de andere kant, om het proces te kunnen beschrijven aan de hand van de welbekende PDF's, moet de transversale impuls van het quarkonium groot zijn ten opzichte van de zogenoemde niet-perturbatieve quantumchromodynamische energieschaal (de energie waarbij geen storingsrekening meer kan toepassen). In het laatste geval moet er een extra gluon worden uitgezonden in de storingsrekening om de  $J/\psi$  een grote transversale impuls te geven. Er is een gebied waar de TMD-PDF en de PDF-beschrijving overlappen en gelijk aan elkaar moeten zijn zoals schematisch weergegeven in figuur 3. Waar de twee beschrijvingen overlappen zijn de TMD-PDF's te relateren aan de welbekende PDF's. Daarnaast is de vormfunctie in de PDF-beschrijving simpelweg de LDME. Wat dus nodig is om deze beschrijvingen exact gelijk aan elkaar te maken in het overlapgebied is de vormfunctie. Daarbij merken we op dat deze methode niet alleen voor  $J/\psi$ -productie kan worden gebruikt, maar ook voor andere soortgelijke processen.

### Een azimutale asymmetrie als hulpmiddel

Nu we de vormfunctie hebben gevonden zijn de enige onbekende functies van het proces de TMD-PDF's. Om theoretisch numerieke voorspellingen te doen kunnen we hiervoor testfuncties gebruiken of ze relateren aan de bekende PDF's (zoals in de matching-



Figuur 5. Illustratie van het EIC-project. De groene, gele en blauwe ring maken onderdeel uit van de bestaande deeltjesversneller die protonen- of zware-ionenbundels laat botsen. Met de komst van de elektronenbundel faciliteit (rood), kunnen er in de toekomst ook elektron-protonbotsingen plaatsvinden. Credits: Brookhaven National Laboratory.

berekening hierboven). Met het laatste hebben we bijvoorbeeld een studie uitgevoerd die voorspelt dat er in dit proces een azimuthale asymmetrie ( $\Phi_T$ ) ontstaat, een hoek tussen het elektronvlak en het proton- $J/\psi$ -vlak, als het proton ongepolariseerd is [3] (weergegeven in figuur 4).

In de TMD-PDF-beschrijving bestaat het ongepolariseerde proton zowel uit een ongepolariseerd-gluon-TMD-PDF als uit een lineair-gepolariseerd-gluon-TMD-PDF [4]. Met andere woorden, het gluon dat uit het proton wordt verstrooid is ofwel ongepolariseerd ofwel lineair gepolariseerd. In tegenstelling tot de welbekende PDF's, zijn de TMD-PDF's namelijk gevoelig voor de polarisatie van het parton en er bestaan dus meerdere TMD-PDF's voor een bepaald parton. De asymmetrie die in dit proces ontstaat is evenredig aan de ratio van die twee gluon-TMD-PDF's: de lineair gepolariseerde gluon-TMD-PDF gedeeld door de ongepolariseerde gluon-TMD-PDF. Het is dus dankzij de lineair gepolariseerde gluonen dat deze azimuthale asymmetrie bestaat. Volgens

onze berekeningen is deze asymmetrie meetbaar in het toekomstige EIC-experiment en men kan dus ook door middel van zo'n asymmetrie nieuwe inzichten over de gluon-TMD-PDF's verkrijgen.

### Conclusie

Met behulp van het theoretische model voor de elektron-proton naar  $J/\psi$ -reactie kunnen we in de toekomst gluon-TMD-PDF's proberen te vinden met behulp van experimenten. Hierbij moeten we wel rekening houden met de vormfunctie, maar er is nu een manier voor om die te vinden. In de tussentijd kunnen we modellen gebruiken om al iets te zeggen over de TMD-PDF's, zoals de asymmetrie die ontstaat wanneer het proton ongepolariseerd is. Er zijn nog veel meer gluon-TMD-PDF's die bestudeerd kunnen worden aan de hand van dit proces, bijvoorbeeld door middel van andere asymmetrieën die ontstaan met een gepolariseerd proton. Daarnaast zijn er ook andere veelbelovende processen die toegang kunnen geven tot de

driedimensionale gluonstructuur van het proton waar geen vormfunctie voor nodig is, zoals proton-protonbotsingen naar quarkonium [5]. Een concreet voorbeeld hiervan is de proton-protonbotsing naar twee  $J/\psi$ 's waarbij de theorie al kan worden vergeleken met data van Large Hadron Collider-experimenten in Genève [6], wat natuurlijk erg interessant is. Daarom bestudeer ik ook proton-protonreacties in mijn huidige onderzoek, waarbij de uitdaging is dat er altijd twee TMD-PDF's afkomstig van de twee protonen tegelijkertijd aan de reactie bijdragen. Concluderend, quarkoniumproductie is een sterk hulpmiddel om onze kennis over de onbekende driedimensionale gluonstructuur van het proton beter in beeld te krijgen.

### REFERENTIES

- 1 D. Boer et al. (2020).
- 2 D. Boer, J. Bor, L. Maxia, C. Pisano en F. Yuan (2023).
- 3 J. Bor en D. Boer (2022).
- 4 P.J. Mulders en J. Rodrigues (2001).
- 5 D. Boer en C. Pisano (2012).
- 6 F. Scarpa et al. (2020).